



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STAVEBNÍ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

**ÚSTAV ŽELEZNIČNÍCH KONSTRUKCÍ A STAVEB**

INSTITUTE OF RAILWAY STRUCTURES AND CONSTRUCTIONS

**ANALÝZA DYNAMICKÝCH ÚČINKŮ V OBLASTI  
SRDCOVKY ŽELEZNIČNÍ VÝHYBKY**

THE ANALYSIS OF DYNAMIC EFFECTS IN THE FROG REGION OF RAILWAY TURNOUT

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

DIPLOMA THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Bc. Arsen Balash

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

prof. Ing. JAROSLAV SMUTNÝ, Ph.D.

**BRNO 2021**



## VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T009 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav železničních konstrukcí a staveb

### ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Arsen Balash
Název	Analýza dynamických účinků v oblasti srdcovky železniční výhybky
Vedoucí práce	prof. Ing. Jaroslav Smutný, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2020
Datum odevzdání	15. 1. 2021

V Brně dne 31. 3. 2020

doc. Ing. Otto Plášek, Ph.D.  
Vedoucí ústavu



prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.  
Děkan Fakulty stavební VUT

## PODKLADY A LITERATURA

Jurda K., Drahoš M.: Železniční spodok a svršok I., II., Nadas 1988

Vlasák J.: Výhybky a výhybková spojení, NADAS, 1983

Smutný J., Pazdera L.: Železniční stavby – měřící technika, VUT FAST, 1998, ISBN 80-214-0976-2

Coenraad Esveld: Modern railway track, TU Delft, 2001, ISBN 90-800324-3-3

Popp K., Schiehlen W.: System dynamics and long-term behaviour of railway vehicles, track and subgrade, Springer, ISBN 3540438920, 2002

Moravčík M., Moravčík M.: Mechanika železničních tratí 3 – Experimentálna analýza namáhania a pretvorenia komponentov trate, EDIS, Žilina, 2002, ISBN 80-7100-985-7

Plášek O., Zvěřina P., Svoboda R., Mockovčiak M.: Železniční stavby, Cerm, 2004, ISBN 80-214-2621-7

Hodnocení dynamických účinků působících na výhybky, Certifikovaná metodika,

Ministerstvo Dopravy - odbor kosmických aktivit a ITS, 124/2014-710-VV/1, 2014

Hodnocení dynamických účinků v konstrukci pražcového podloží výhybky, Certifikovaná metodika, Ministerstvo Dopravy - odbor kosmických aktivit a ITS, 123/2014-710-VV/1, 2014

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Náplní diplomové práce bude experimentální analýza dynamických účinků působících na oblast srdcovky železničních výhybek při pojezdu vlakových souprav včetně návrhu zjednodušené metodiky měření a analýzy naměřených parametrů. Předpokládá se analýza naměřených dat se zaměřením na vliv tuhosti uzlu upevnění. K vyhodnocení naměřených dat bude studentem zvolen vhodný matematický aparát. Předpokládá se využití matematických metod v časové a frekvenční oblasti. Součástí práce bude rovněž srovnání parametrů testovaných konstrukcí a doporučení pro praxi.

Doporučené přílohy:

Rozbor současného stavu dané problematiky

Návrh metodiky měření dynamických parametrů

Analýza měřených dat v časové oblasti

Analýza měřených dat ve frekvenční oblasti

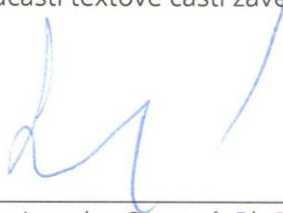
Srovnání testovaných konstrukcí

Závěry a doporučení

## STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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



---

prof. Ing. Jaroslav Smutný, Ph.D.  
Vedoucí diplomové práce

## POPISNÝ SOUBOR ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

**Vedoucí práce** prof. Ing. Jaroslav Smutný, Ph.D.

**Autor práce** Bc. Arsen Balash

**Škola** Vysoké učení technické v Brně

**Fakulta** Stavební

**Ústav** Ústav železničních konstrukcí a staveb

**Studijní obor** 3607T009 Konstrukce a dopravní stavby

**Studijní program** N3607 Stavební inženýrství

**Název práce** Analýza dynamických účinků působících na výhybky

**Název práce** Analysis of dynamic effects acting on railway crossings

**v anglickém jazyce**

**Typ práce** Diplomová práce

**Přidělovaný titul** Ing.

**Jazyk práce** Čeština

**Datový formát  
elektronické verze** PDF

**Abstrakt práce** Práce je zaměřena na měření a analýzu dynamických účinků v železničních výhybkách. V rámci práce byly porovnány dvě výhybky stejného typu s odlišnou pružností v uzlu upevnění. Pozornost byla zaměřena na oblast srdcovky výhybky, kde dochází k největším dynamickým účinkům. Cílem práce je srovnání srdcovek výhybek z hlediska dynamického chování a stanovení vlivu zpružnění uzlu upevnění na šíření dynamické energie konstrukcí. Součástí práce je také volba vhodné metodiky měření a návrh matematického aparátu pro vyhodnocení dynamických dějů ve výhybkách.

**Abstrakt práce  
v anglickém  
jazyce** This thesis is focused on measurement and analysis of dynamic effects on railway turnouts. Two same-type turnouts with different fastening elasticity were chosen. My attention was focused mainly on the crossing part of the turnout, where the highest dynamic impacts occur. The point of the thesis is comparison of the crossing part of turnouts in term of dynamic behaviour and assessment of influence of soft rail pads on spread of dynamic energy through the construction. A part of the thesis is choice of methodology of the measurement and proposal of convenient mathematical apparatus for analysing of the dynamic effects on crossings.

**Klíčová slova** výhybka, srdcovka, měření dynamických účinků, zjednodušená metodika, pohyby pražců, vibrace

**Klíčová slova v  
anglickém  
jazyce** turnout, crossing part, measurement of dynamic effects, simplified methodics, bearers displacement, vibrations

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 15. 1. 2021

---

Bc. Arsen Balash  
autor práce

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Arsen Balash Analýza dynamických účinků v oblasti srdcovky železniční výhybky. Brno, 2021. 70 s., 29 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav železničních konstrukcí a staveb. Vedoucí práce prof. Ing. Jaroslav Smutný, Ph.D.

## ABSTRAKT

Práce je zaměřena na měření a analýzu dynamických účinků v železničních výhybkách. V rámci práce byly porovnány dvě výhybky stejného typu s odlišnou pružností v uzlu upevnění. Pozornost byla zaměřena na oblast srdcovky výhybky, kde dochází k největším dynamickým účinkům. Cílem práce je srovnání srdcovek výhybek z hlediska dynamického chování a stanovení vlivu zpružnění uzlu upevnění na šíření dynamické energie konstrukcí. Součástí práce je také volba vhodné metodiky měření a návrh matematického aparátu pro vyhodnocení dynamických dějů ve výhybkách.

## KLÍČOVÁ SLOVA

výhybka, měření dynamických účinků, vibrace, srdcovka, zjednodušená metodika, pohyby pražce

## ABSTRACT

This thesis is focused on measurement and analysis of dynamic effects on railway turnouts. Two same-type turnouts with different fastening elasticity were chosen. My attention was focused mainly on the crossing part of the turnout, where the highest dynamic impacts occur. The point of the thesis is comparison of the crossing part of turnouts in term of dynamic behaviour and assessment of influence of soft rail pads on spread of dynamic energy through the construction. A part of the thesis is choice of methodology of the measurement and proposal of convenient mathematical apparatus for analysing of the dynamic effects on crossings.

## KEYWORDS

turnout, measurement of dynamic effects, crossing part, simplified methodics, vibrations, bearer displacement

## PODĚKOVÁNÍ

Myslím, že je třeba velmi poděkovat vedoucímu mé diplomové práce prof. Ing. Jaroslavu Smutnému, Ph.D, který mi věnoval mnoho svého volného času při konzultacích, trpělivě mi vysvětloval problematiku této diplomové práce a pomáhal mi i v organizačních věcech, které by pro mě jako cizince byly těžkou překážkou. Proto ještě jednou mu patří velký dík. Bez jeho všestranné pomoci si nedovedu představit, že bych diplomovou práci zvládl.

Dále bych chtěl také poděkovat všem pracovníkům Ústavu železničních konstrukcí a staveb na VUT v Brně. Jejich přístup a způsob předávání znalostí ve mně zanechal hluboký dojem a byl hnacím motorem pro mé vzdělávání. Také bych v neposlední řadě chtěl poděkovat všem, kteří přiložili ruku k dílu a pomohli mi orientovat se v dané problematice.



## Obsah

Obsah.....	1
1. Úvod .....	3
2. Cíle práce.....	4
3. Rozbor konstrukce železničního svršku.....	5
3.1 Kolejnice .....	5
Kolejnice tvaru 60E1 .....	6
Kolejnice tvaru 49E1 .....	7
Opornice .....	7
Jazyky .....	8
Opornicové opěrky .....	9
Srdcovka.....	9
3.2 Železniční pražce.....	12
Dřevěné pražce .....	12
Ocelové pražce .....	14
Výhybkové betonové pražce .....	16
3.3 Podpražcové podložky .....	17
3.4 Kolejové lože.....	18
3.5 Upevnění kolejnic .....	19
4. Metodika měření.....	21
4.1 Analýza v časové rovině .....	23
4.2 Analýza ve frekvenční rovině .....	25
4.3 Snímače .....	26
4.3.1 Indukčnostní snímače.....	26

4.3.2 Piezoelektrické snímače .....	28
4.3.3 Tenzometrické snímače.....	30
4.4 Rozbor oblastí metodiky .....	31
4.4.1 Analýzu pohybů (posunů) konstrukce .....	31
4.4.2 Analýza pohybového chování konstrukce .....	34
4.4.3 Měření deformace (napětí) v konstrukci .....	37
5. Návrh vlastního měření .....	38
5.1 Popis lokality měření.....	39
5.2 Měřicí sestava a parametry měření .....	41
6. Vyhodnocení měření .....	45
6.1 Vyhodnocení pohybového chování.....	46
6.2 Vyhodnocení zrychlení vibrací na železničním svršku výhybek.....	50
6.3 Vyhodnocení ve frekvenční rovině .....	58
7. Celkové zhodnocení měření .....	63
8. Závěry a doporučení.....	64
Seznam použitých zkratk a symbolů .....	66
Literatura .....	68
Seznam příloh.....	70

# 1. Úvod

Od samého vzniku lidstva, všichni jdeme cestou vývoje, pokroku a inovací. V dnešní době je rozvoj nedílnou součástí jakéhokoli odvětví. Jedním z nejdůležitějších odvětví je možné schválně nazvat dopravu, bez níž si lze jen těžko představit jakékoli jiné odvětví ekonomiky. Doprava je jako žilní organismus, který spojuje a vyživuje celou ekonomiku státu, světa. Odvětví dopravního průmyslu je železnice, která také věnuje značnou pozornost rozvoji v mnoha směrech, z nich jsou zvýšení životnosti železničních konstrukcí a zvýšení rychlosti pohybu vlaků, snížení nákladů na jednotlivé konstrukce a snížení nákladů na údržbu železnice.

Velmi důležitou součástí železnic jsou výhybky, které jsou nenahraditelnou a důležitou součástí při tvorbě sítě železnic. V rámci vývoje, na jedné straně jsou výhybky zajímavé z hlediska zlepšení jednotlivých částí, zvýšení délky jejich životního cyklu a účinnosti složek v celé konstrukci, na druhou stranu ve výhybkách dochází k obrovskému dynamickému zatížení. Se zvýšením rychlosti jízdy vlaků, se objevuje nové výzvy ve stavbách železnic, všechny součásti výhybky vnímají mnohem větší zatížení, což nutí k sledování těchto problémů, analýze jich a hledání metod snížení ovlivnění stresových faktorů nebo posílení konstrukci.

Je také důležité věnovat značnou pozornost ochraně šterkového lože, které přijímá zatížení vlaků přenášené přes koleje, upevnění a pražce. Šterkového lože je nejslabší částí železničního svršku, s jeho degradací se zvyšují rizika pro ostatní součásti. Proto je velmi důležité věnovat pozornost všem součástem svršku železnice tak, aby všechny části spolupracovaly bez poškození a rychlé degradace.

V celé síti železničních tratí výhybky jsou malou částí od celkové protaženosti koleje, ale náklady na tyto konstrukce jsou mnohem vyšší a z konstruktivního hlediska mnohem složitější. Proto vzniká potřeba neustále věnovat analýze chování výhybek.

## 2. Cíle práce

Na zpracování daného tématu práce, je nutné ji rozdělit do několika fází a postupně je projít. Celý svazek lze rozdělit na víceméně konkrétní cíle:

- Prvním cílem lze nazvat seznámení se znalostmi v této oblasti, pomocí odborné literatury. Osvojit si znalosti a porozumět principy fungování jednotlivých komponentů konstrukci a vzájemné spolupráce mezi nimi.
- Dalším důležitým cílem je seznámení a nastudování certifikované metodiky «Hodnocení dynamických účinků působících na výhybky».
- Z ohledu na využití v certifikované metodice [7] velkého počtu snímačů, navrhnout jednoduchou metodiku měření dynamických účinků. Základem zjednodušené metodiky bude certifikovaná metodika [7].
- Navrženou metodiku použít při praktickém využití na měření dynamických účinků ve výhybkách různého typu (s klasickým upevněním a se zpružněným). Zúčastnit v měření, z měření dostat data pro vyhodnocení.
- Na základě dat provést hodnocení dynamických účinku měřených konstrukci
- Udělat závěry a doporučení, za podmínky vhodných výsledků, doporučit používat zjednodušenou metodiku měření častěji v praxi.

### **3. Rozbor konstrukce železničního svršku**

Se zvýšením rychlosti jízdy vlakové soupravy, zvyšují se působení na kolejovou dráhu. Při jízdě vlaků se přenášejí dynamické i mechanické vlivy nejenom na kolejnice ale zcela na svršek a spodek. Dynamické i mechanické vlivy jsou způsobené silovým působením od nápravy (svislý směr) vznikající vlastní tíhou soupravy, příčné namáhání (v obloucích), podélné namáhání při rozjezdech a brzděních, pak ve vztahu kolo-kolejnice vznikají procesy valení a tečného posunutí. Všechny vlivy vedou do vzniku vibrací a posunů, které se roznáší po celé konstrukce železničního svršku a spodku. A to od nejhornější části koleje přes upevnění do kolejnicových podpor.

Kolejnice rozdělují zatížení, vyvolané jedoucimi vozidly, na jednotlivé pražce. Velikost síly, kterou kolejnice přenáší na pražce, je určena tvarem kolejnice, pružností uložení kolejnice na pražec, tvarem pražce a rozdělením pražců. Kolejové lože je pak tedy namáháno nerovnoměrně podle toho, jak je napětí rozloženo na ložné ploše pražce. S tím souvisí i nerovnoměrné namáhání pláň železničního spodku [1], [5], [9].

Všechny popsané silové vlivy od vlakové soupravy u výhybkových konstrukcí se zvyšují a dohromady s tím vznikají další složitější jevy. Tady dochází ke změně tuhosti, přerušení pojížděné hrany kolejnice, nestálému průřezu kolejnic, taky mění se rozměr pražců.

#### **3.1 Kolejnice**

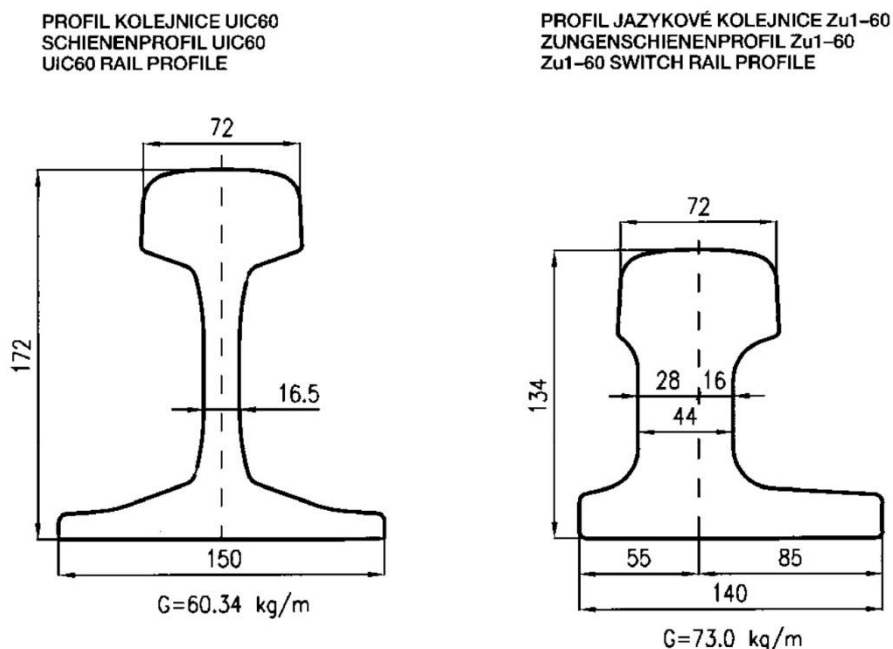
Kolejnice je základní část železničního svršku, která je v přímém kontaktu s kolem vlakové soupravy a přijímá od něho silové zatížení. Taky kolejnice předává zatížení na pražce, vytváří pojízdni dráhu, slouží omezením libovolného směru jízdy pro dvojkolí a vede jen v přímém směru, absorbuje brzděné a rozjezdové síly.

V současné době v ČR v rámci modernizace kolejového svršku se používají jenom kolejnice nových tvaru evropského standardů: 49E1, 60E1 a 60E2.

Kolejnice jsou uloženy zpravidla v úklonu 1:20 nebo 1:40, ve výhybkách, kolejových křižovatkách, kolejových spojkách, na točnách a přesuvnách jsou kolejnice uloženy bez úklonu. Přejechod z úklonu 1:20 do polohy bez úklonu se zřizuje použitím podkladnic s úklonem 1:40 a 1:80. Pro výhybkové konstrukce se nejčastěji používají kolejnice soustav UIC 60, v našem měřeném úseku je to tato kolejnice, která se běžně používá na koridorových tratích [1].

### Kolejnice tvaru 60E1

Její hmotnost je 60,21kg/m, výška 172 mm, šířka paty 150 mm. Šířka hlavy této kolejnice 72 mm. Svými rozměry se velmi podobá kolejnici R65, ovšem 60E1 je trochu nižší. Tím se také odvíjí malý rozdíl hmotností mezi těmito kolejnici. Horní hranu paty kolejnice má zalomenou se sklonem 1:2,75. Tento sklon platí i pro spodní hranu hlavy této kolejnice. Poloměry vymezující tvar horní části hlavy kolejnice jsou 300 mm a 60 (70) mm, [8].

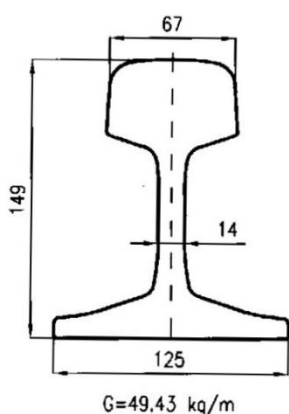


Obr. 3.1.1 Kolejnice soustavy UIC 60 ve výhybce (převzato z katalogu DT výhybkárna a mostárna) [2]

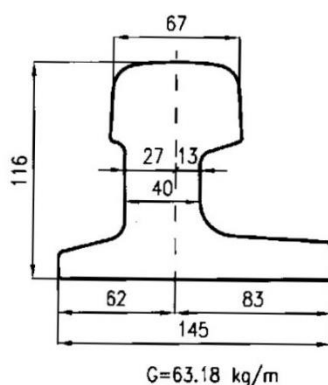
## Kolejnice tvaru 49E1

Její hmotnost je 49 kg/m, výška 149 mm, šířka paty 125 mm. Oproti kolejnici R65 má menší tloušťku stojiny (14 mm oproti R65, která má tloušťku stojiny 18 mm), horní hranu paty kolejnice má zalomenou se sklonem 1:3. Tento sklon platí i pro spodní hranu hlavy této kolejnice. Poloměry vymezující tvar horní části hlavy kolejnice jsou 300 mm.[8]

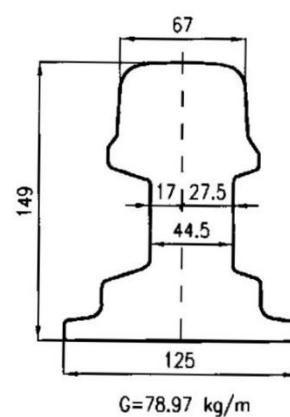
PROFIL KOLEJNICE S49  
SCHIENENPROFIL S49  
S49 RAIL PROFILE



PROFIL JAZYKOVÉ KOLEJNICE I49  
ZUNGENSCHIENENPROFIL I49  
I49 SWITCH RAIL PROFILE



PROFIL SRDCOVKOVÉ KOLEJNICE S49  
HERZSCHIENENPROFIL S49  
S49 FULL WEB RAIL FOR CROSSING POINTS



Obr. 3.1.2 Výhybkové kolejnice soustavy S 49 (převzato z katalogu DT výhybkárna a mostárna) [2]

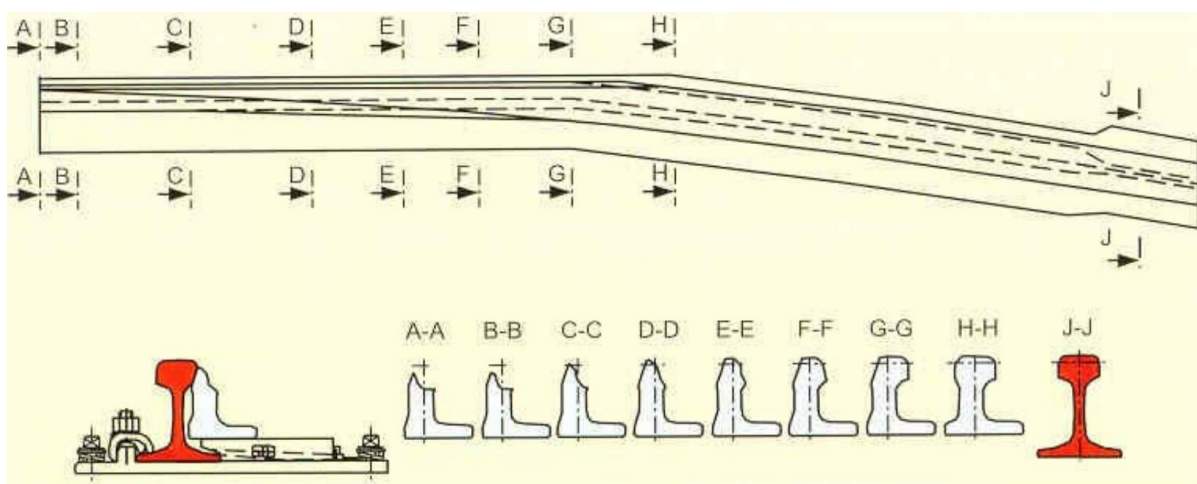
## Opornice

Opornice jsou kolejnice běžného průřezu, ale jiných délek z odlišným děrováním. V přímé větvi výhybky zůstává opornice přímá, v obloukové větvi je ohnutá. Hlava většinou je opracována, a to v oblasti styku s jazykem, aby jazyk mohl zachovat minimální konstrukční tloušťku a nemusel vybíhat do příliš ostrého hrotu.“ Pojízďená hlava je v tomto místě obvykle upravena do sklonu 3:1. Opornice je děrována, a to zásadně v neutrální ose. Toto děrování slouží k připevnění opornicové a jazykové opěrky [1].

## Jazyky

Jazyky jsou nejdůležitější a nejnamáhavější součástí výhybky. Po délce se průřez zmenšuje a oslabuje, a v této oblasti na něj působí nejvíce vliv řídicích sil vozidla. Navíc v tomto místě též přejímá ve svislém směru síly od kol vozidel. Je vyrobena zpravidla z lepší oceli, než je ocel pro běžné kolejnice. Jazyk je nižší než opornice, z toho důvodu, aby se jazyk mohl položit na kluzné stoličky, které posouvají jazyk v příčném směru. Tyto kluzné stoličky jsou upevněny na pražcích. Tvar hlavy je shodný s tvarem kolejnice ostatních částí výhybky. Zpravidla se používají jazykové kolejnice v soustavě železničního svršku 49E1. Aby jazyk při opracování směrem k hrotu udržel nutnou konstrukční tloušťku, je stojina vždy o mnoho tlustší než stojina kolejnice. Pro zvýšení tuhosti jazyka ve vodorovném směru slouží mohutnější patka. Tato mohutná patka též zlepšuje uložení na kluzných stoličkách a usnadňuje umístění spojovacích tyčí ve výměně a montáži hákového uzávěru [1].

Z hlediska dynamických účinků musí být přejezd kola z opornice na jazyk postupný a bez rázů, a proto je jazyk upraven výškově a směrově. Vzniká tím netypický tvar v místě styku s opornicí. Tímto se zajistí dostatečná tuhost proti účinkům vnějších sil.



Obr. 3.1.3 Jazyk výhybky a jeho hoblování [1]



## **Opornicové opěrky**

Opornicové opěrky zabezpečují opornici proti působení příčných sil. Opírají se pod hlavou a na patě, a k podkladnici jsou připevněny svěrkovými šrouby. Jazykové opěrky zajišťují přenos vodorovných příčných sil, které vznikají provozem z jazyku na opornici. Je potřeba využít těchto opěrek v místě, kde se jazyk přiráží k opornici. Délka je nejdůležitější pro správnou funkčnost jazykových opěrek jejich. V provozu by neměla být mezera mezi jazykovou opěrkou a přiléhajícím jazykem větší, než 5 mm. Při nedodržení dochází k deformacím jazyku při průjezdu vozidla [1].

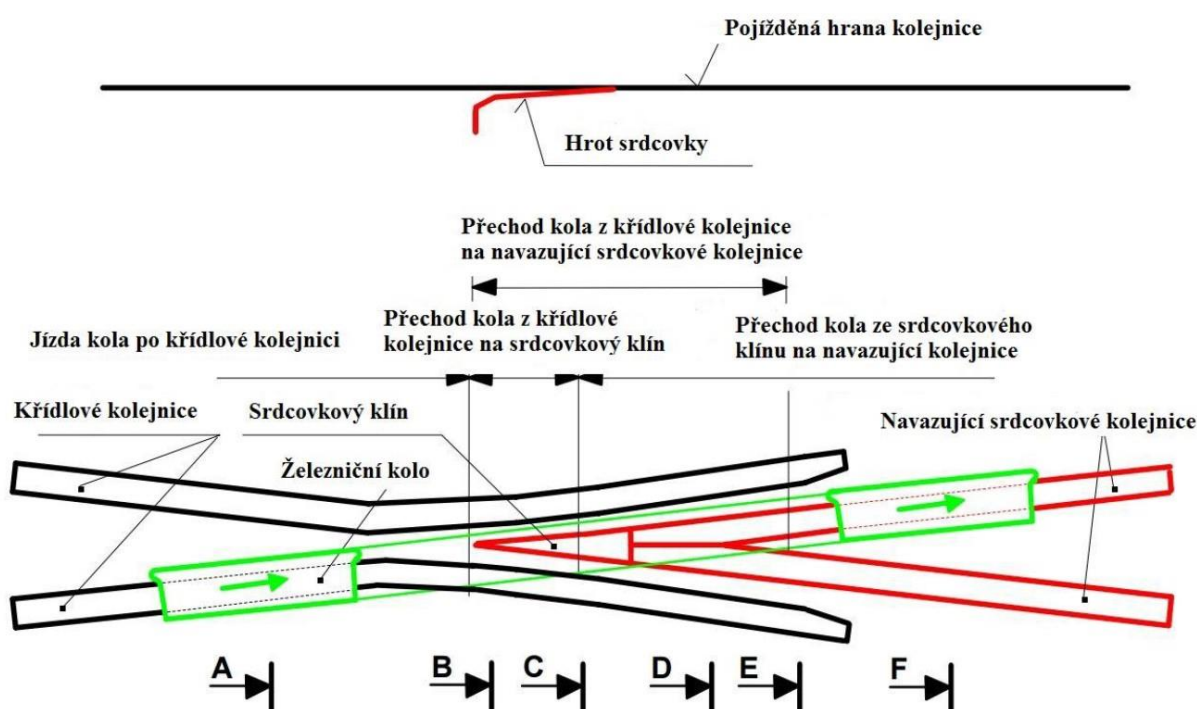
## **Srdcovka**

Srdcovka tvořená křížením pojížděných hran kolejnic. Srdcovková část výhybky se skládá z křídlových kolejnic, srdcovkového klínu a srdcovkových kolejnic navazujících na srdcovkový klín. Samozřejmě že nejdůležitějším místem srdcovkové části z hlediska dynamických účinků je oblast přechodu z křídlové kolejnice na hrot srdcovky, kde dochází, v závislosti na kvalitě geometrie přechodu, k dynamickému rázu. Tento ráz se přes pražce přeneso do kolejového lože, které je tím extrémně namáháno, což vede k obrušování zrn kameniva šterkového lože na styku s pražcem, v důsledku čeho, dochází k degradaci tvaru kolejového lože pod pražcem, a to způsobí nedostatečné podepření výhybky. Pokud není výhybka dostatečně podepřena, zhroutlí se geometrie přechodu z křídlové kolejnice na hrot srdcovky a celý proces degradace se tím velmi urychlí. Proto je nezbytné věnovat těmto částem jízdní dráhy zvýšenou pozornost. Abych vyhnout se výše uvedenému procesu degradace, je klíčovou záležitostí udržení geometrie přechodu z křídlové kolejnice na hrot srdcovky co nejdélejší dobu v optimálním stavu. [7] [10]



Obr. 3.1.4 Srdcovková část výhybky č. 3

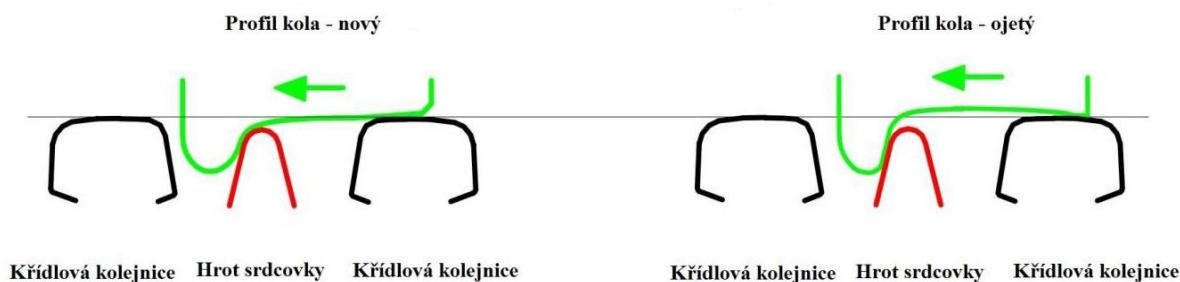
Přechod kola z křídlové kolejnice na hrot srdcovky ovlivňuje další parametry: stav výhybkové konstrukce (profil hlavy kolejnic, rozchod, úklon kolejnic, převýšení, podložka pod patou kolejnice, upevnění, pražce, podpražcové podložky, šterkové lože, železniční spodek), stav železniční soupravy (odpružení, hmotnost na nápravu, kvalita jízdní plochy nákolku kola).



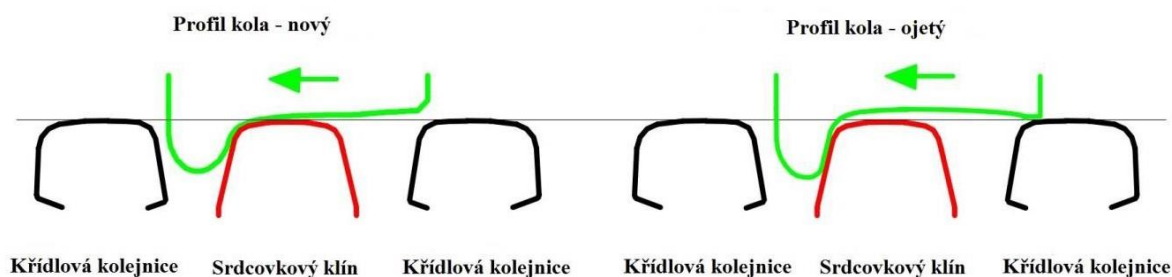
Obr. 3.1.5 Schematické znázornění přejezdu dvojkolí přes srdcovku – pohled shora [13] [15]

Při průjezdu najíždí kolo na křídlovou kolejnici, která se před hrotem srdcovky odkloní k ose koleje, aby vytvořila prostor pro srdcovkový klín. Vlivem

tvaru železničního kola se poloměr, po kterém kolo jede, směrem od okolku zmenšuje. Dochází tak ke klesání kola ve vertikální rovině, a to až do místa, kde narazí na srdcovkový klín, který je v určitém úklonu. Od tohoto momentu začne kolo opět stoupat, až se dostane do polohy, ve které bylo před najetím na odklon křídlové kolejnice. Abych nemohlo by dojít k vykolejení, se na straně odlehlé od srdcovky montuje přídržnice, která přidrží dvojkolí ve správné stopě. [10]



Obr. 3.1.5 Řez B – vlevo nové kolo, vpravo ojeté [13] [15]



Obr. 3.1.5 Řez C – vlevo nové kolo, vpravo ojeté [13] [15]

Plynulost přechodu kola z křídlové kolejnice na hrot srdcovky je závislá na geometrických vlastnostech kola i kolejnic. Zvýšené dynamické účinky se vyskytnou při přejezdu opotřebeného kola novou srdcovkou, stejně tak, jako při přejezdu nového kola srdcovkou, která je ve špatném stavu [11]. Z výše uvedeného je zřejmé, že ojeté kolo má jinou trajektorii pohybu a zatěžuje srdcovku větším impaktním zatížením, než je tomu u plynulého přechodu nového kola. Samozřejmě je možné geometrii přechodu částečně přizpůsobit i ojetým kolům, ale kolům s válcovým nebo konkávním průřezem nebude možné geometrii přizpůsobit nejspíše nikdy. [13]

## 3.2 Železniční pražce

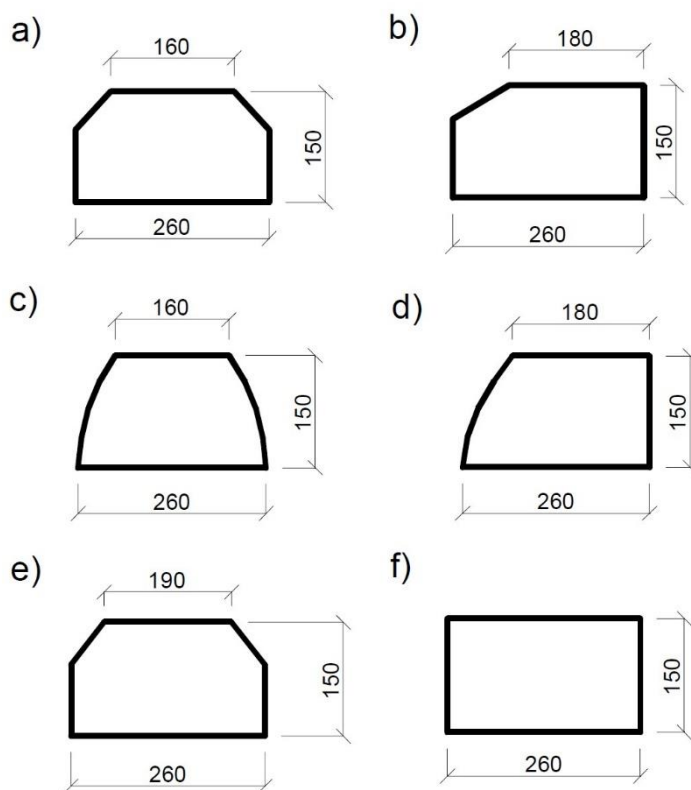
Železniční pražec je další důležitou součástí železničního svršku, dohromady s kolejnicemi vytváří kolejový rošt. Pomocí pražců se zajišťuje se rozchod koleje. Další důležitá funkce pražců – přenos zatížení od kolejnice do pražcového podloží. Podle materiálu pražce jsou betonové, dřevěné, ocelové.

Velmi důležitou funkcí, kterou plní příčný pražec, je zajištění příčného odporu. Příčné pražce musí být za hlavami správně zašterkovány a nesmí se vytvářet volné prostory mezi čely pražců a kolejovým ložem (např. jako důsledek příčného pohybu pražce v oblouku od radiálních sil daných teplotními změnami). Vzdálenost pražců je charakterizována rozdělením pražců. Typ pražce se volí podle charakteru železniční trati, účelu koleje a podle přepočteného provozního zatížení. V současné době u nově vkládaných kolejí převládají betonové pražce.

### Dřevěné pražce

Dřevěné pražce v minulosti byly nejpoužívanějším typem příčných pražců. Výhody dřevěných pražců jsou: dobré tlumící schopnosti, dostatečná životnost, snadné zřízení změny rozchodu koleje, snadná výroba.

Dřevěné pražce se používají v kolejích, kde není vhodné zvyšovat hmotnost kolejových polí, v kolejích s očekávanými nepravidelnými poklesy nivelety koleje v důsledku poddolování, v zarážkových obvodech pod spádovišti, kde je větší riziko vykolejení, ve výběžích pojistných úhelníků na mostních konstrukcích, v kolejích s přídržnou nebo ochrannou kolejnicí a v některých případech u dilatačních zařízení. Dřevěné pražce se použijí i v kolejích, kde nelze zřídit na betonových pražcích projektované rozšíření rozchodu. Použijí se také u přípojných polí za kolejovými konstrukcemi (výhybkami, křižovatkami apod.) na dřevěných pražcích. [4]



Obr. 3.2.1 Příčné řezy dřevěných pražců a) b) tvar A; c) d) tvar B; e) f) výhybkové pražce [4]

Vzhledem k růstu nápravových hmotností a vzniku bezстыkové koleje, u dřevěných pražců se objevují nevýhody: upevnění kolejnice má omezenou životnost, menší příčný a podélný odpor proti posunutí v kolejovém loži, nedostatek kvalitního tvrdého dřeva, složité podkladnicového upevnění.

Životnost dřevěných pražců závisí na druhu dřeva a účinnosti impregnace. Ovlivňují ji provozní zatížení, rychlost jízdy vlaků a hmotnost na nápravu. Životnost dřevěných pražců je také dána konstrukčním a geometrickým uspořádáním koleje a celkovým udržovacím stavem konstrukce železničního svršku a spodku, zejména kolejového lože, pražcového podloží a odvodnění. Životnost pražců z měkkých dřevin je 15–20 let, bukových pražců 25–40 let, dubových 20–60 let.

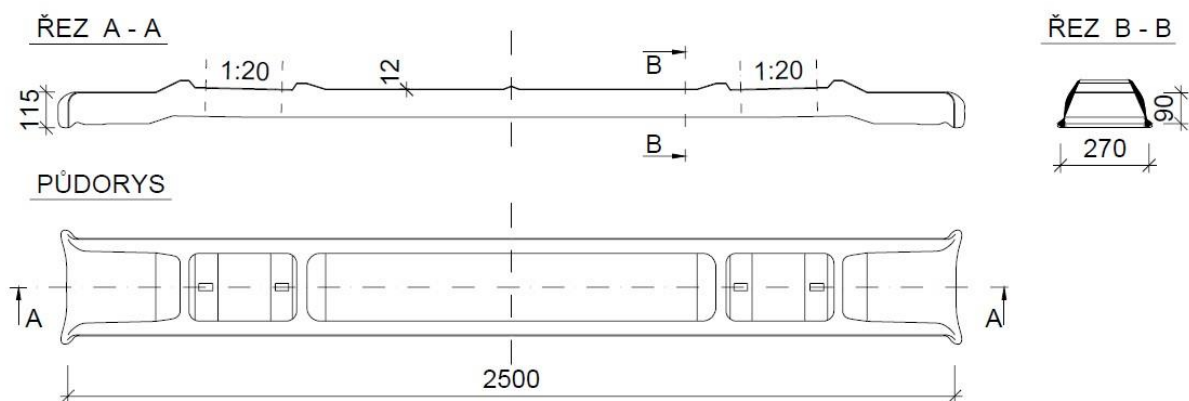


Obr. 3.2.2 Dřevěné pražce, připravené k upevnění kolejnic [25]

## Ocelové pražce

Ocelové pražce mají své nevýhody: vysoká cena, nemají izolační vlastností, koroze, těžké podbíjení pražců. Tyto pražce jsou kratší, takže mohou být použity i v užším zemním tělese a šetří se tím objem materiálu i zemních prací.

Výhodami těchto pražců byly: dlouhá životnost, vysoký podélný a příčný odpor kvůli korýtkovému tvaru, jsou malé výrobní odchylky.



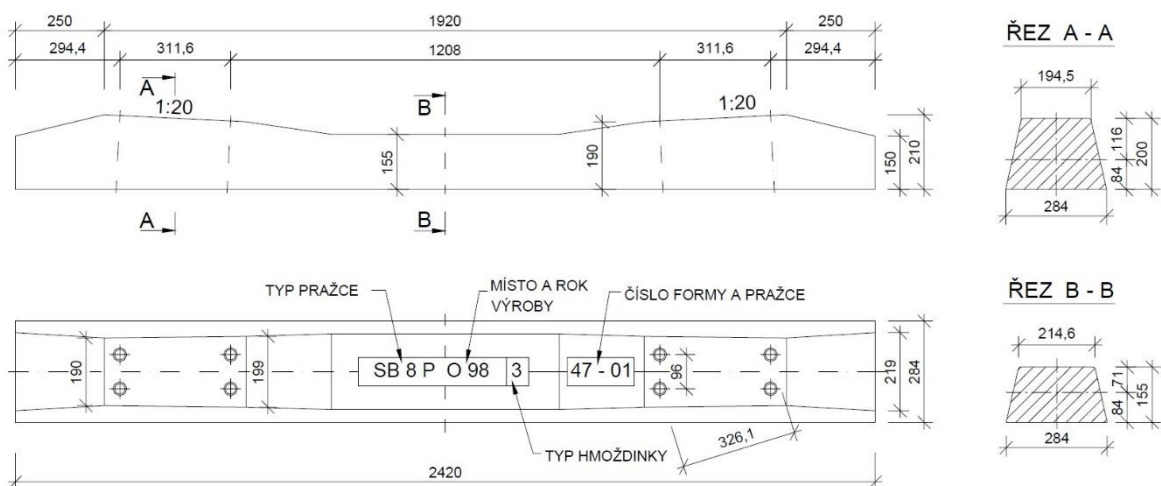
Obr. 3.2.3 Ocelový pražec T 3 [4]

## Betonové pražce

Betonové pražce vyrábí se z předpjatého betonu. V současné době nejrozšířenějším typem pražců a zaměňují se za dřevěné zejména v rámci modernizací, jenom se nechají v místech, kde nelze použít betonové. Betonové pražce mají své výhody ohledně ostatních: výška hmotnost, která zajistí stabilitu pro bezстыkovou kolej, jednoduchá výroba, dlouhá životnost, možnost z různých variant pražcové konstrukci a možnost navrhnout. Ale taky jsou nevýhody: dobře přenáší vibrace od systému kolo-kolej, předává do kolejového lože větší dynamické zatížení, menší pružnost.

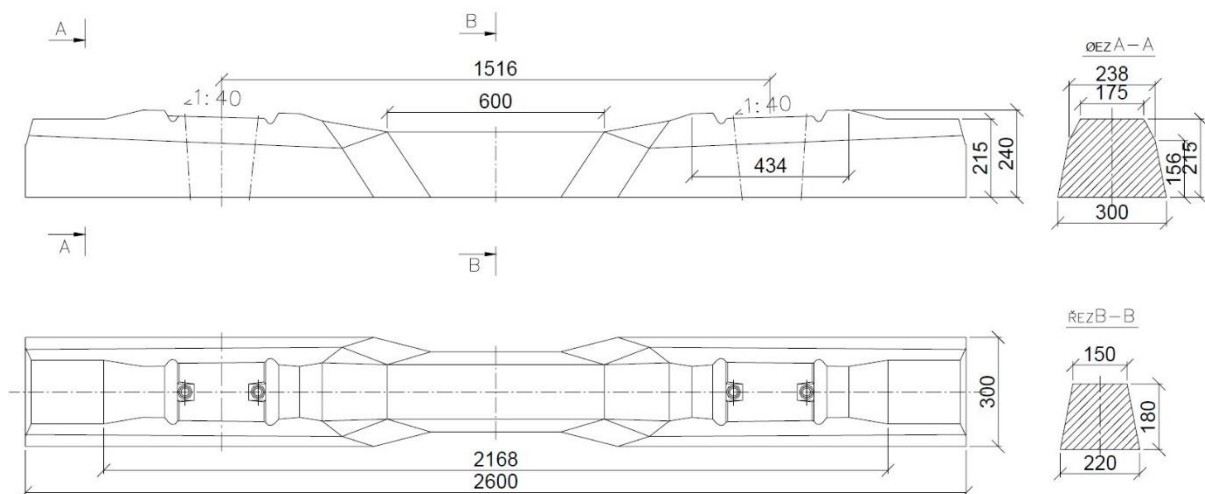
Betonové pražce vytváří dva základní geometrické typy: pražce monoblokové a dvoublokové (skládá se z bloky spojených tyčí z jiného materiálu).

Nejrozšířenějším typy betonových pražce v současné době jsou SB8 a B91S. Geometrické parametry je vidět na obrázcích (obr 3.5, obr 3.6)



Obr. 3.2.4 Pražec SB 8P [4]

**SB 8** monolitický pražec z předpjatého betonu vyztužený 40 Ø 3,0 mm žebrované podkladnice S 4pl a U 60 (R 4pl), původně se vyráběl s dřevěnými vložkami, v současné době se vyrábí s polyamidovými vložkami (SB 8P), dl. 2420 mm [4].



Obr. 3.2.5 Pražec B91S [4]

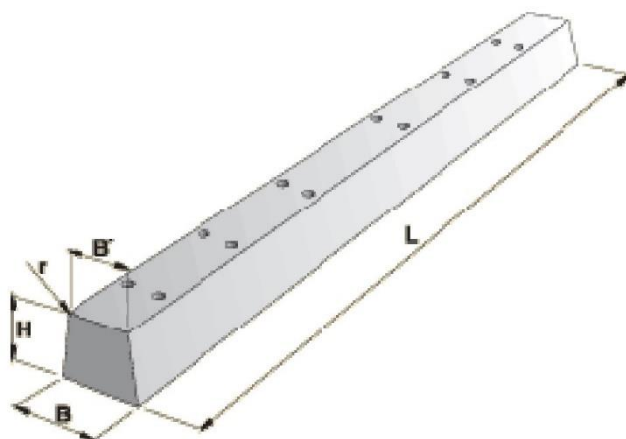
- B 91 S** monolitický pražec z předpjatého betonu vyztužený 10  $\varnothing$  6,0 mm, upevnění pružné bezpodkladnicové, dodává se ve variantách B 91 S/1 pro upevnění Vossloh, kolejnice UIC 60 a R 65, B 91 S/2 pro upevnění Vossloh a kolejnici S 49, B 91 S/5 (dnes B 91 P) upevnění PANDROL a kolejnici UIC 60 a R 65, navržen pro ohybové momenty v průřezu pod kolejnicí +16,0 kN.m a ve středu pražce -12,5 kN.m, předpínací síla 273 až 284 kN, dl. 2600 mm [4]

### Výhybkové betonové pražce

Ve výhybkách se používají pražce z tvrdých dřevin, ocelové a v současné době především z předpjatého betonu. V dané diplomové práci byly měřené výhybky s betonovými pražci.

Délka výhybkových pražců je odstupňována po 10 cm, vzdálenost pražců je přibližně 600 a 550 mm. U výhybek současné konstrukce jsou pražce vějířovitě uspořádány, pro levou i pravou výhybku se použije stejná sada pražců z předpjatého betonu.





Obr. 3.2.6 Pražec B91S [2]

### 3.3 Podpražcové podložky

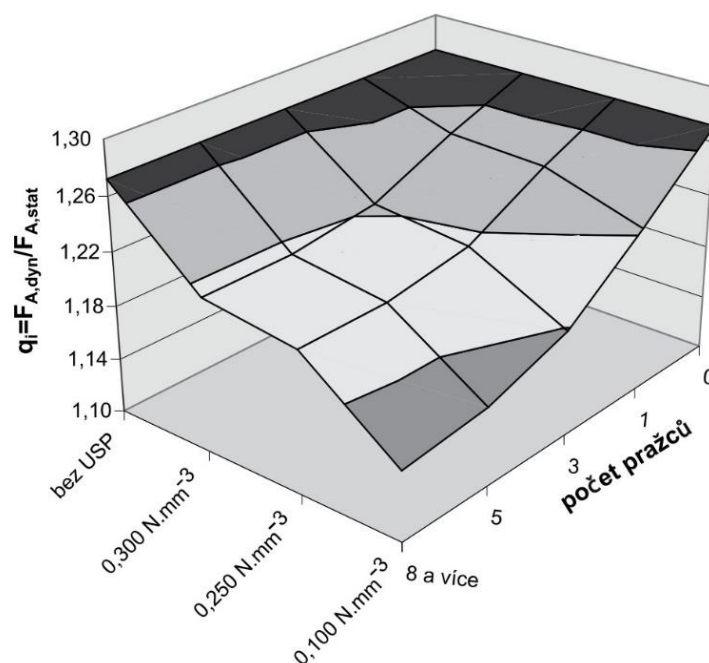
Podpražcové podložky určené pro zmenšení dynamického zatížení, co přenáší se od pražce do kolejového loze, pro ochranu ložné plochy pražce.



Obr. 3.3.1 Podložky společnosti Getzner SLB 2210G po 190 milionech celkových tun. [26]

Úpravou velikosti dynamických sil ve výhybce lze snížit opotřebení částí výhybky a prodloužit její životnost. Snížení velikosti těchto sil lze mimo jiné dosáhnout např. Změnou tuhosti uložení. Vhodné se jeví použití pružné ložné

plochy pražce, a to zejména s relativně nízkým modulem ložnosti. Přitom není nutné, aby všechny pražce ve výhybce byly opatřeny pružnou ložnou plochou. USP je možné použít pouze v těch oblastech výhybky, kde se významně projevuje negativní vliv nehomogenní jízdní dráhy, zejména v srdcovce. [6]



Obr. 3.3.2 Vliv pružné ložné plochy pražce na snížení dynamických sil v srdcovkové části výhybky z důvodu poklesu jízdní dráhy kola [6]

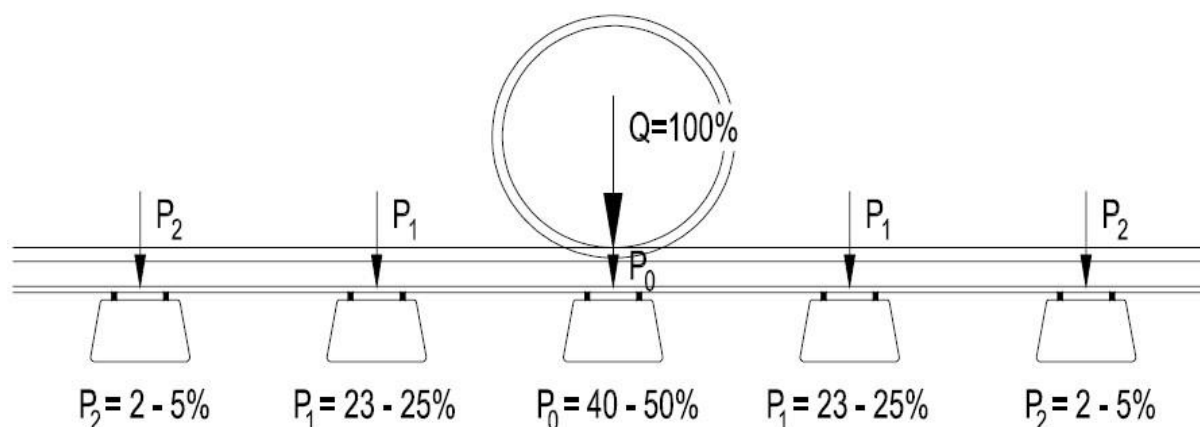
### 3.4 Kolejové lože

Kolejové lože je spodní a základní součást železničního svršku, slouží pro uložení kolejového svršku v něm, přenášení do kolejového roštu na pláň tělesa železničního spodku, dává možnost upravovat výškové uspořádání koleje. Taky slouží jako záchrana od příčného a podélného posunutí koleje.

Většinou se tvoří sypaným zrnitým materiálem, ve tvaru lichoběžníku, s šířkou v horní části cca 1,7 m od osy koleje, používá se kamenivo frakci 31,5/63. Kolejové lože má další parametry: tloušťka – v rozsahu 200-350 mm (v závislosti na kategorie trati a druhu pražce, tloušťka je měřená od spodní plochy pražce do plání tělesa železničního spodku), geotechnické vlastnosti kameniva, ekologické vlastnosti, profil kolejového lože. Materiál kolejového lože musí splňovat zejména

další požadavky: pevnost, materiál se nesmí pod jedoucimi vozidly a při podbíjení pražců drtit, odolnost proti účinkům mrazu.

Kolejové lože je na základě vnitřního úhlu tření schopno přenášet svislá tlaková namáhání, nepřenáší tahová namáhání. Schopnost přenášet vodorovná zatížení je u kolejového lože výrazně nižší. Velikost napětí na ložné ploše pražce je závislá na tvaru kolejnice, na typu použitého pražce, na typu upevnění kolejnic, na tuhosti konstrukčních vrstev železničního spodku a kolejového lože samotného.[4]



Obr. 3.9 Schéma rozdělení kolové síly na jednotlivé pražce [4]

### 3.5 Upevnění kolejnic

Koleje se upevňují na podpory pomocí upevňovadel a drobného kolejiva, která zajišťuje stálou polohu kolejnic a rozchod koleje. Upevnění má být dostatečně tuhé i pružné, při současně jednoduchosti a snadné udržitelnosti. Kolejnice se upevňují na podpory buď přímo nebo prostřednictvím podkladnice.

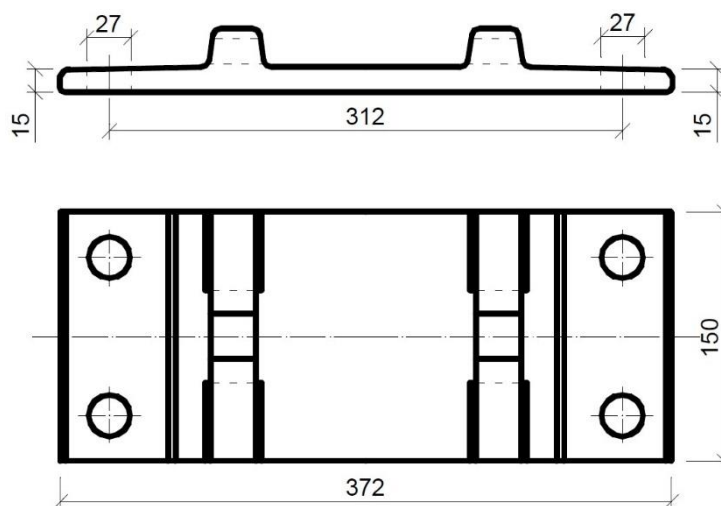
K upevnění kolejnice se užívá drobné kolejivo (podkladnice, můstkové desky, svěrky, spony, pryžové, penefolové a polyetylenové podložky, vodící vložky a izolátory) a upevňovadla (hřeby, vrtule a pražcové šrouby, spojkové a svěrkové šrouby, vložky M, pružné kroužky, zajišťovací kroužky, podložky, distanční kroužky). [4]

Vrtule slouží k upevnění kolejnice k pražci (v případě přímého upevnění), nebo k upevnění podkladnice k pražci (v případě nepřímého upevnění).

Hmoždinky jsou určeny pro montáž vrtulí nebo pražcových šroubů do betonových pražců. V současné době se vyrábí z polyetylenu a polyamidu.

Podkladnice se vkládají pod patu kolejnice a slouží pro lepší roznášení zatížení od kolejnice do pražce. Podle konstrukčního uspořádání můzou být klínové, rozponové a žebrové.

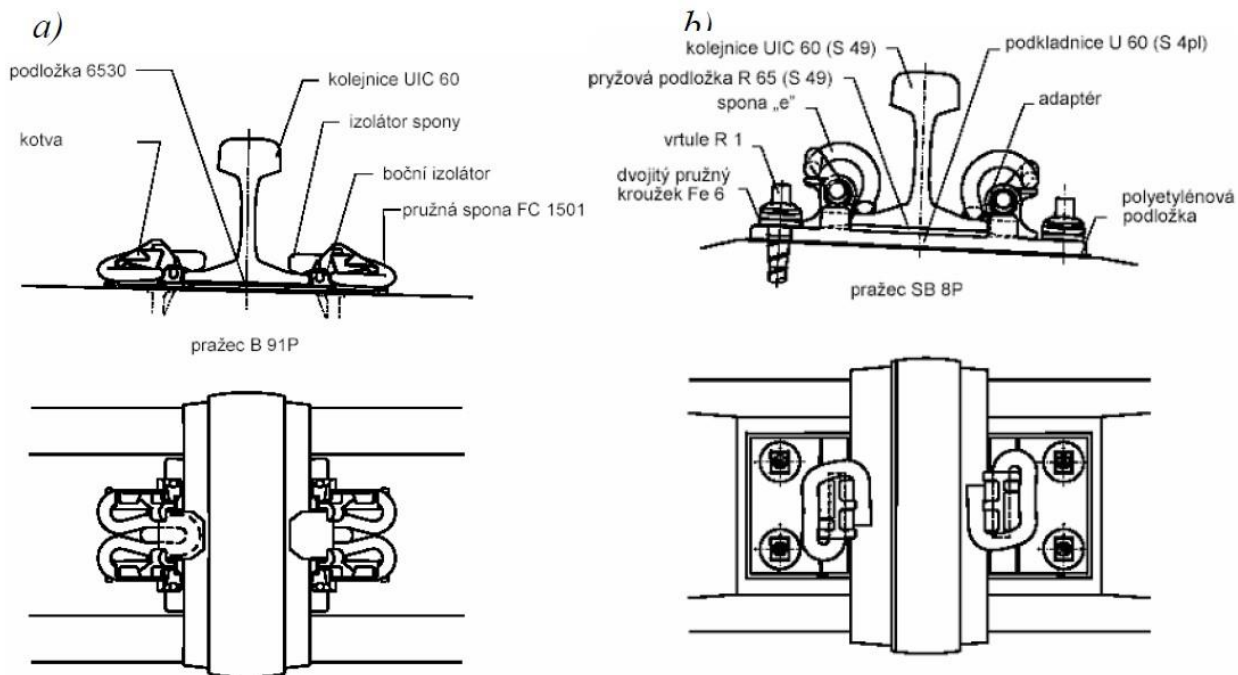
Kolejnice S 49 se upevňuje do žebrové podkladnice S 4 s úklonem úložné plochy 1:20. Při použití pražce s úklonem 1:20 přímo na úložné ploše pražce a ve výhybkách se používají podkladnice S 4pl (ploché), které nemají úložnou plochu v úklonu. Pro kolejnice R 65 a UIC 60 se užívají podkladnice R 4 s úklonem 1:20. Plochá žebrová podkladnice pro tyto kolejnice má označení U 60. Pro upevnění kolejnic na mostnicích se používají žebrové podkladnice S 4M a R 4M. Tyto podkladnice jsou o 50 mm širší, zatížení se roznáší na větší plochu. [4]



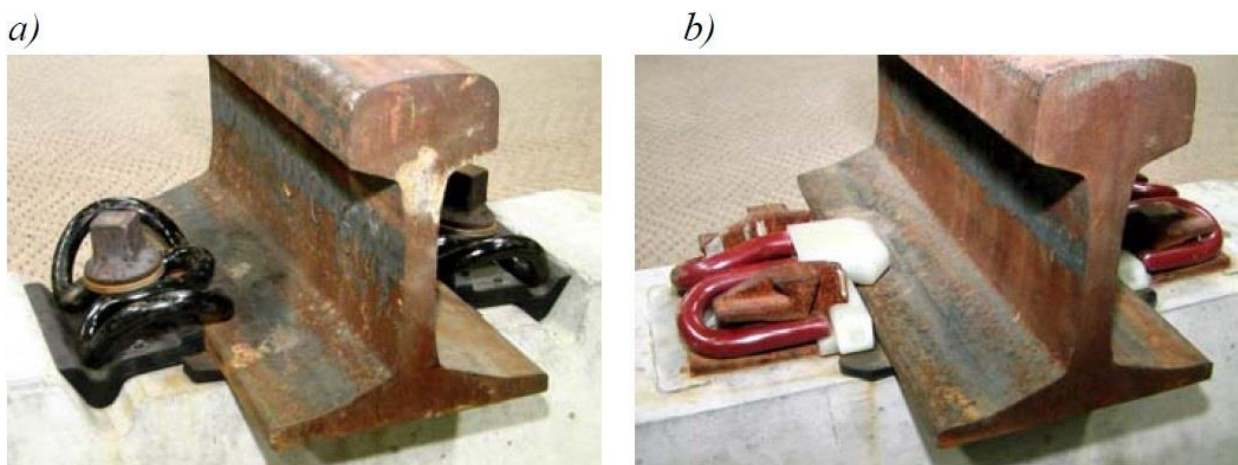
Obr. 3.10 Plochá žebrová podkladnice S 4pl [4]

Svěrky používají se pro upevnění kolejnic. Rozlišují se tuhé a pružné.

Základní výhodou pružných svěrek je poměrně stálá přitlačná síla na dlouhé dráze zdvihu svěrky. Je dostatečně zaručena držebnost uzlu upevnění a podélný odpor proti posunutí kolejnice, a to i při vibracích kolejnice v uzlu upevnění. [4]



Obr. 3.11 a) Upevnění kolejnice UIC 60 na pražci B 91P, upevnění FC I  
 b) Upevnění kolejnice v žebrových podkladnicích pomocí pružné spony Pandrol a adaptéru – Ke [4]



Obr. 3.12 a) Upevnění kolejnice UIC 60, upevnění W 14  
 b) Upevnění kolejnice UIC 60 na pražci B 91P, upevnění FC I [4]

## 4. Metodika měření

Tato práce je věnovaná analýze dynamických účinků působících na výhybky při průjezdu vlakové soupravy. Analýza dynamických účinků, tedy vibrace a

pohybové chování výhybkové konstrukce, se provádí analýzou dat, které dostáváme pomoci měření dané konstrukci určenou metodikou pro měření dynamických účinků. Určená metodika musí být stejná a opakovatelná pro všechny výhybkové konstrukce, aby se dalo porovnávat konstrukce mezi sebou a opakovaně v rámci časové historie. Získaná informace umožňuje pak sledovat stavu výhybkových konstrukci a navrhopvat změny geometrie a materiálu výhybek a vedlejších konstrukci, zlepšovat jízdu vlaku a šetřit náklady na údržbu.

Vhodná metodika měření musí definovat jednotný postup. Z důvodu srovnávání dat od různých společností každé měření je nutné provádět za stejných okolních podmínek. Není jediný způsob měření dynamických účinků, ale musí být zvolen konkrétní sjednocený způsob, totiž certifikovaný způsob, který bude vytvářet „srovnávací úroveň“ pro hodnocení dynamických jevu ve výhybkových konstrukcích. Takovou čaru je možné udělat pomoci mnoha určených kritéria nebo podmínek měření, jsou to: určeny měřiči řetězec, instalace měřicí sestavy, používání stejných snímačů, umístění snímačů na měřené konstrukci atd.

Za výše uvedených podmínek ve své diplomové práci respektuji certifikovanou metodiku [7] měření a hodnocení dynamických účinků působících na výhybky složenou na Ústavů železničních konstrukcí a staveb pod vedením prof. J. Smutného.

Při praktickém použití dané metodiky, ve výsledku dostaneme informace o šíření vibrací a napětí v nejvíce aktivní části konstrukce. Taky dostaneme přehled o kvalitě uložení pražců v kolejovém loži ve vybraných částech výhybek. Tato informace bude důležitou pro výrobce výhybek, pro správce drážních staveb, vývojová pracoviště, taky pro vývojová jednotky.

Přehled chování konstrukce dostaneme pomocí analýzy naměřených signálů v časové a frekvenční oblasti.

Existuje několik přístupů, které jsou vhodné k objasnění dějů ve výhybkách. Tyto je možné rozdělit na experimentální způsob a teoreticky, přičemž teoreticky způsob často je zjednodušený a používá přibližný model sledované konstrukci se

zanedbáním vedlejších účinků, změnou měřítka v průměru při modelování atd. Teoreticky způsob využívá matematické modelování pomocí počítače a softwaru.

Teoretický metod je komplikovaný a potřebuje hodně času na vytváření, přičemž v průběhu vytváření je vysoká pravděpodobnost chyb. Dokonce teoretický metod musí být ověřený experimentálními zkouškami. Aby se zmenšily náklady, nejčastěji tyto dva metody jsou propojeny a se používají jejich kombinace, jako ve většině metodik ve světě.

Certifikovanou metodiku [7] měření a hodnocení dynamických účinků působících na výhybky zahrnuje měření a analýzu pohybového chování výhybky. Jde o měření posunů ve vybraných částech konstrukce. Dále zahrnuje analýzu šíření vibrací ve vybraných částech výhybky od kolejnice přes pražec do kolejového lože. Součástí je také měření a analýza napětí ve vybrané části konstrukce. Metody analýzy zahrnují postupy v časové a frekvenční rovině. [7]

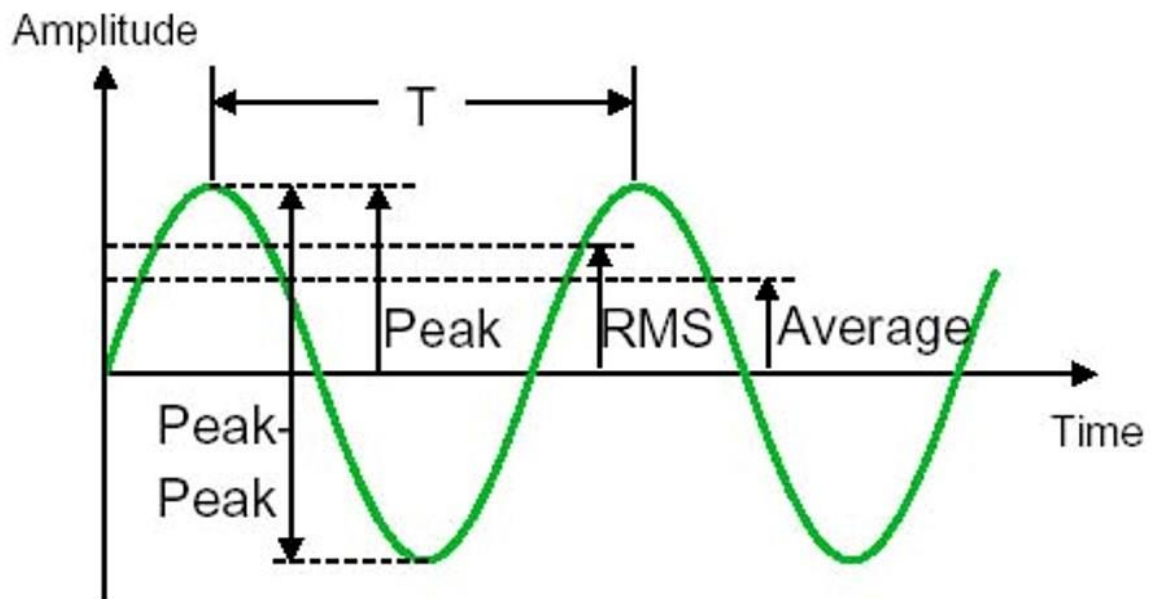
Pro lepší představu musíme popsat měřicí sestavu při měření konstrukci na místě (in-situ), pomocí které dostaneme hodnoty od neznámého zatížení. Souhrn hodnot v časovém průběhu popíší signály, které vytvářejí snímače. Dále musíme rozebrat v detailu princip a logiku měřicí sestavy, vzniknutí signálů a veličiny, které signály vysvětlují.

Jak už bylo naspáno v této práci, vyhodnocování signálů budou zahrnovat časovou a frekvenční oblasti.

#### **4.1 Analýza v časové rovině**

Při měření konstrukce budou naměřená data hodnocena v časové rovině s výstupem časového průběhu měřených veličin. [7] V časové rovině signál můžeme charakterizovat jenom statisticky.

Nejdůležitější veličiny časového signálu jsou maximální hodnoty (Peak), střední hodnota (Average), efektivní hodnota (RMS), maximální rozkmit (Peak – Peak). [12]



Obr. 4.1 Veličiny popisující časový signál [12]

**Maximální hodnota** (Peak), ještě se jmenuje jako špičková hodnota, popisuje jen skokovou změnu vnějších podmínek okamžité hodnoty jevu, například impuls atd.; ukazuje jenom výskyt signálu, nejsou žádné složky sinové a kosinové vlny.

**Střední hodnota** (Average), vyplývá z ustředění špičkových hodnot v časovém průběhu popisování signálů.

**Efektivní hodnota** (RMS - Root Mean Square), která je z hlediska kvantitativního hodnocení amplitud mechanického kmitání nejdůležitější hodnotou. Ukazuje jeho časový průběh a současně má přímý vztah k jeho energetickému obsahu, a tedy je měřítkem nebezpečnosti a škodlivosti mechanického kmitání. RMS můžeme popsat následujícím vzorcem:

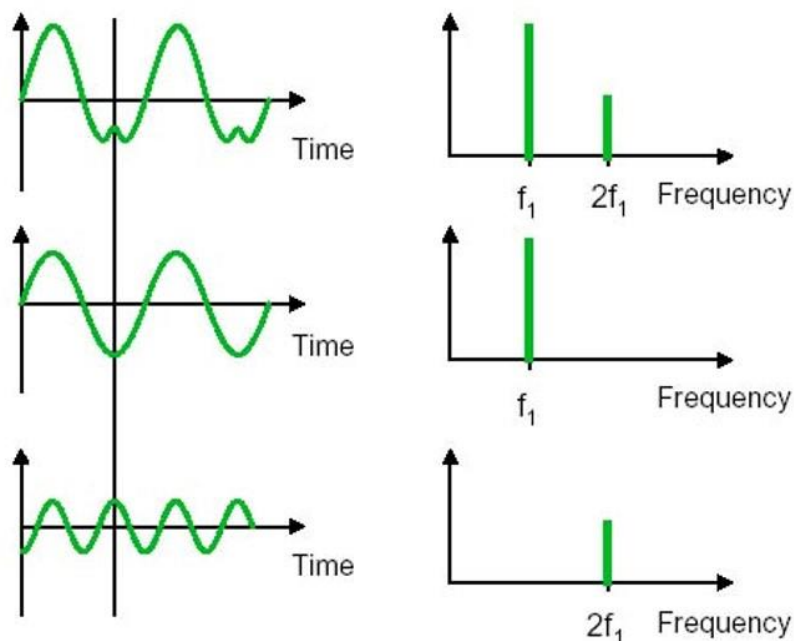
$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$$

kde:  $T$  – je čas měření neznámé fyzikální veličiny  
 $x_2(t)$  - je signál závislý na časovém průběhu



## 4.2 Analýza ve frekvenční rovině

Frekvenční oblast nám poskytne mnohem důležitější informace, než časová. Proto obvykle je převádění z časové oblasti do jiné, zejména do frekvenční. Znázornění takového převádění je možné vidět na obr. 4.2.



Obr. 4.2 Přechod z časové oblasti do frekvenční [12]

Klasická frekvenční analýza je založena na matematickém teorému, že každá periodická křivka může být určena jako součet sinusových křivek, které jsou harmonickými složkami daného průběhu  $f(t)$  [14].

$$f(t) = A_0 + A_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + A_2 \sin(\omega t + \varphi_2) + \dots$$

Pomocí převádění signálu z časové roviny do frekvenční, můžeme zjistit, jaké frekvence jsou obsaženy v signálu. Obvyklé se převod realizuje pomocí Fourierovi transformace.

Fourierova metoda je metoda schopna vcelku dobře vystihnout skutečný tvar příslušného spektra. Jsou vhodné zejména pro zpracování stacionárních signálů, ale dají se při určitém omezení použít i pro nestacionární nebo odezvové signály. Nevýhodou však je, že nejsou vhodné stabilní odhady při použití pro signály s krátkou dobou trvání, pro které není možné použít průměrování. Proto se využívají alternativní postupy, např. použití parametrických metod.[14]

Pro Fourierovu transformaci se používá vztah:

$$x(t) = k_1 \cdot \int_{-\infty}^{\infty} X(f) \cdot e^{-i2\pi ft} dt$$

kde:  $f$  je frekvence

$t$  je čas

$x(t)$  je signál v časové oblasti

$X(t)$  je jeho reprezentace ve frekvenční oblasti

$i = \sqrt{-1}$

$k_1$  je konstanta

### 4.3 Snímače

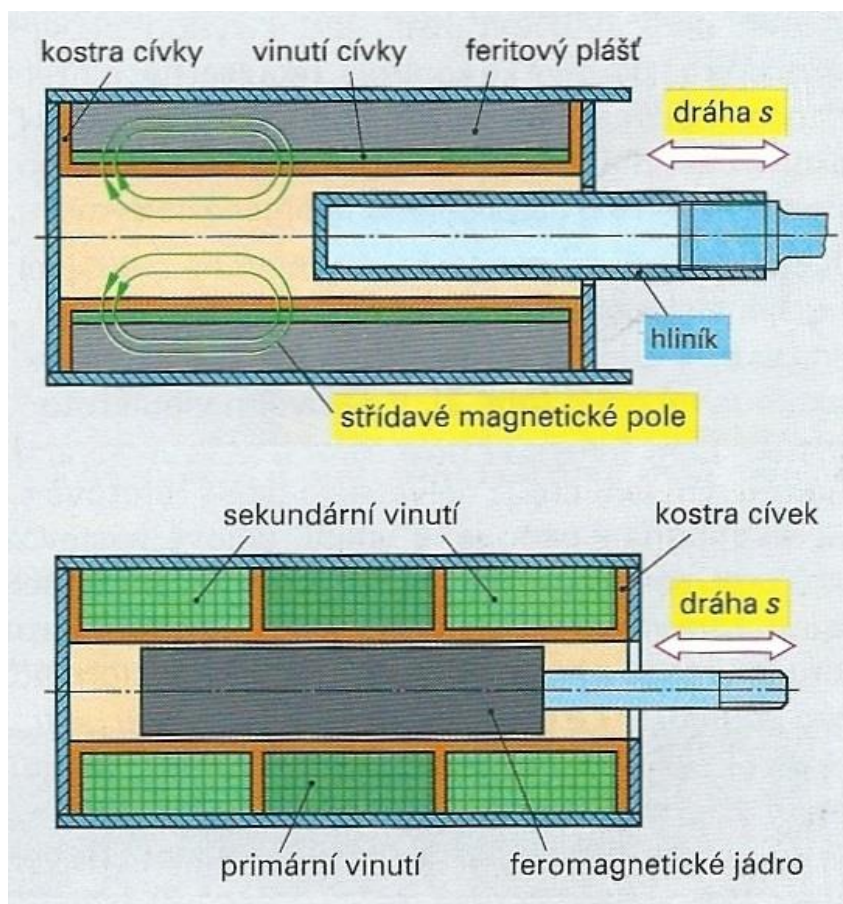
V této kapitole chtěl bych popsat snímače, citlivé součástí měřického řetězce, pomocí kterých můžeme zafixovat změnu stavu konstrukce pod vlivem jízdy vlakových souprav. Existuje hodně druhů snímačů, já zastavím se jen ta těch, které používá ve svém postupu certifikovaná metodika [7]:

- Indukčnostní snímače posunu;
- Piezometrické snímače vibrace;
- Tenzometrické snímače napětí.

#### 4.3.1 Indukčnostní snímače

Pro měření posunu obvykle používají se indukčnostní snímače. Ten druh snímačů je založen na fyzikálním jevu – indukčnosti, která vyjadřuje velikost magnetického indukčního toku kolem cívky při jednotkovém elektrickém proudu, co prochází cívkou. Indukčnost jako základní charakteristika cívky, vyjadřuje schopnost ji měnit elektrickou energii na energii magnetického pole Obr. 4.4.1. V případě z aktivním měniči, elektrický výkon se vyvolává změny magnetického

toku cívky. Pokud jde o pasivní převodník, způsobem je působení mechanické veličiny, která má za následek měnící se hodnotu indukčnosti.



Obr. 4.4.1 Snímače polohy - Indukčnostní snímače [22]

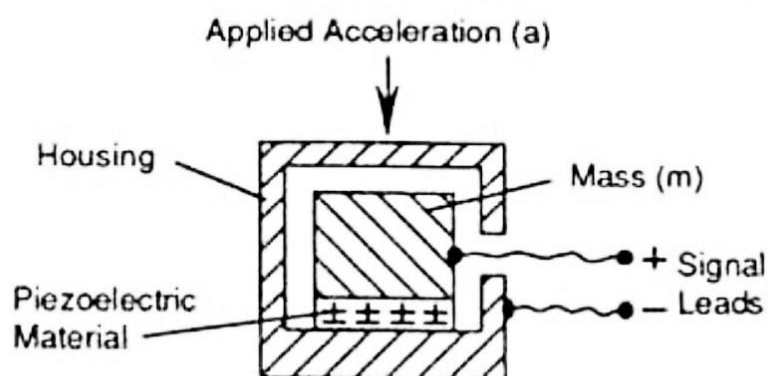
Mezi vývody indukčních snímače jsou velký rozsah měření (0-500 mm), jednoduché zapojení, spolehlivost a jednoduchá konstrukce. Mezi nevýhody těchto snímačů patří hmotnost pohyblivých částí, závislost výstupního signálu na amplitudě a frekvenci napájecího napětí, požadavek převážně střídavého napětí a teplotní závislosti feromagnetických materiálů a jejich stárnutí, potřebují vztažný bod – proto v postupu certifikované metodiky [7] je nutné zapuštění ocelového rámu snímače do šterkového lože. [17]

Měřenou veličinou je časový průběh výchylky kmitání. Výhodou této metody je, že je možné využít kvalitních snímačů dráhy  $s$  s dobrou linearitou a také skutečnost, že není nutné provádět žádné přepočty.

### 4.3.2 Piezoelektrické snímače

Piezoelektrické snímače mají široký pracovní frekvenční a dynamický rozsah, proto se používají nejčastěji. Mezi další výhody těchto snímačů jsou pevná a odolná konstrukce, stabilita a spolehlivost, definovaná linearita ve frekvenčním a dynamických rozsazích, rychlost nastavení, nechtějí vnější zdroj, nemají pohyblivé části. Nevýhodou bude cena zařízení.

Tento typ snímačů je založen na piezometrickém jevu, kdy využívají piezoelektrický krystal (přírodní nebo keramiku), který generuje náboj úměrný působící síle, která při zrychlení působí na každý objekt. Nejjednodušší schéma principu piezoelektrických akcelerometrů viz Obr. 4.3.2.



Obr. 4.3.2 Schéma principu piezoelektrických akcelerometrů [24]

U snímačů používaných v praxi je piezoelektrický člen konstruován a umístěn tak, že při kmitavém pohybu snímače na něj působí síla úměrná zrychlení přídavné hmoty. Toto uspořádání odpovídá Newtonovu zákonu, podle nějž je síla rovna součinu hmoty a zrychlení [17].

Citlivost snímače je jedním z jeho nejdůležitějších parametrů. Ideální by byl snímač, který generuje co největší elektrický signál již při poměrně malých zrychleních vibrací, ale zde je nutný kompromis, protože vysoká citlivost snímače znamená také použití velkého piezoelektrického členu a tím i velkého snímače a to jak rozměrově tak i hmotností. Platí tedy, že snímače s vysokou citlivostí jsou rozměrově větší a proto se tyto typy používají spíše pro měření vibrací na

budovách. Ve většině případů však citlivost snímače není kritická, protože moderní předzesilovače umožňují zpracování i velmi slabých elektrických signálů [17].

### Univerzální snímače zrychlení



Citlivost: 1—10 pC/m.s<sup>-2</sup>  
 Váha: 10—50 g  
 Kmitočtový rozsah: 0—12 000 Hz

### Miniaturní snímače zrychlení



Citlivost: 0,05—0,3 pC/m.s<sup>-2</sup>  
 Váha: 0,4—2 g  
 Kmitočtový rozsah: 1—25 000 Hz

### Speciální snímače zrychlení



1 — současné měření chvění ve třech vzájemně kolmých směrech

2 — nepřetržité monitorování chvění strojních zařízení

2 — měření chvění při vysokých teplotách

3 — měření chvění budov, stavebních a strojních konstrukcí atd.

4 — cejchování a jiné referenční účely

5 — měření mechanických rázů [1000 km/s<sup>2</sup> (100 000 g)]

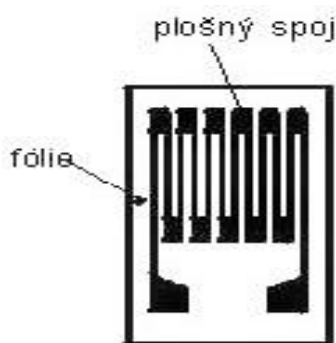
Obr. 4.3.2.1 Piezoelektrické snímače zrychlení [17]

Při výběru vhodného snímače je rovněž nutné věnovat pozornost pracovnímu frekvenčnímu rozsahu použitého snímače, aby jeho pracovní rozsah pokrýval celou škálu kmitočtů, které chceme měřit. Kmitočtový rozsah, v němž snímač zrychlení pracuje jako přesný lineární měnič, je v oblasti nízkých kmitočtů omezen dvěma faktory. Prvním je dolní mezní frekvence předzesilovače, k němuž je snímač připojen. Toto omezení zpravidla nečiní praktické potíže, protože dolní mez

většiny kvalitních předzesilovačů leží hluboko pod 1 Hz. Druhým omezujícím faktorem je vliv změn teploty prostředí, k nimž jsou piezoelektrické snímače zrychlení citlivé. Současné snímače zrychlení, jejichž piezoelektrický člen je namáhán stříhem, se vyznačují malou citlivostí ke změnám teploty a při normálních teplotách mohou být úspěšně použity k měření vibrací s frekvencí menší než 1 Hz. Horní mez pracovního frekvenčního rozsahu snímačů zrychlení je určena vlastní rezonanční frekvencí celého systému, tedy hmoty a pružiny.[17]

### 4.3.3 Tenzometrické snímače

Odporový tenzometr patří mezi převodníky sloužící k elektrickému měření neelektrických veličin. Tenzometr je pasivní prvek, používaný jako senzor k nepřímému měření mechanického napětí na povrchu součásti prostřednictvím měření její deformace. Mezi nejčastěji používanými jsou kovové odporové tenzometry, můzou být drátkové a foliové. U foliových je vodičem kovová fólie (tloušťky kolem 0,001 mm) na nosné izolační podložce.



Obr. 4.3.3 Fóliový tenzometr [23]

Tenzometr se přilepí na povrch měřeného objektu speciálním lepidlem. Spojení se nesmí utrhnout v celém rozsahu měřených deformací. Pro zvýšení odporu tenzometru a zachování jeho přijatelné délky má tenzometr více rovnoběžných úseků vodiče spojených příčnými úseky. Krátké příčné úseky s větším průřezem jsou málo citlivé na deformaci kolmou na podélnou osu měření.

## 4.4 Rozbor oblastí metodiky

Certifikovaná metodika [7] zahrnuje několik etap nebo oblastí měření chování

konstrukce, proto dává nám komplexní přehled o stavu sledované konstrukce, jsou to:

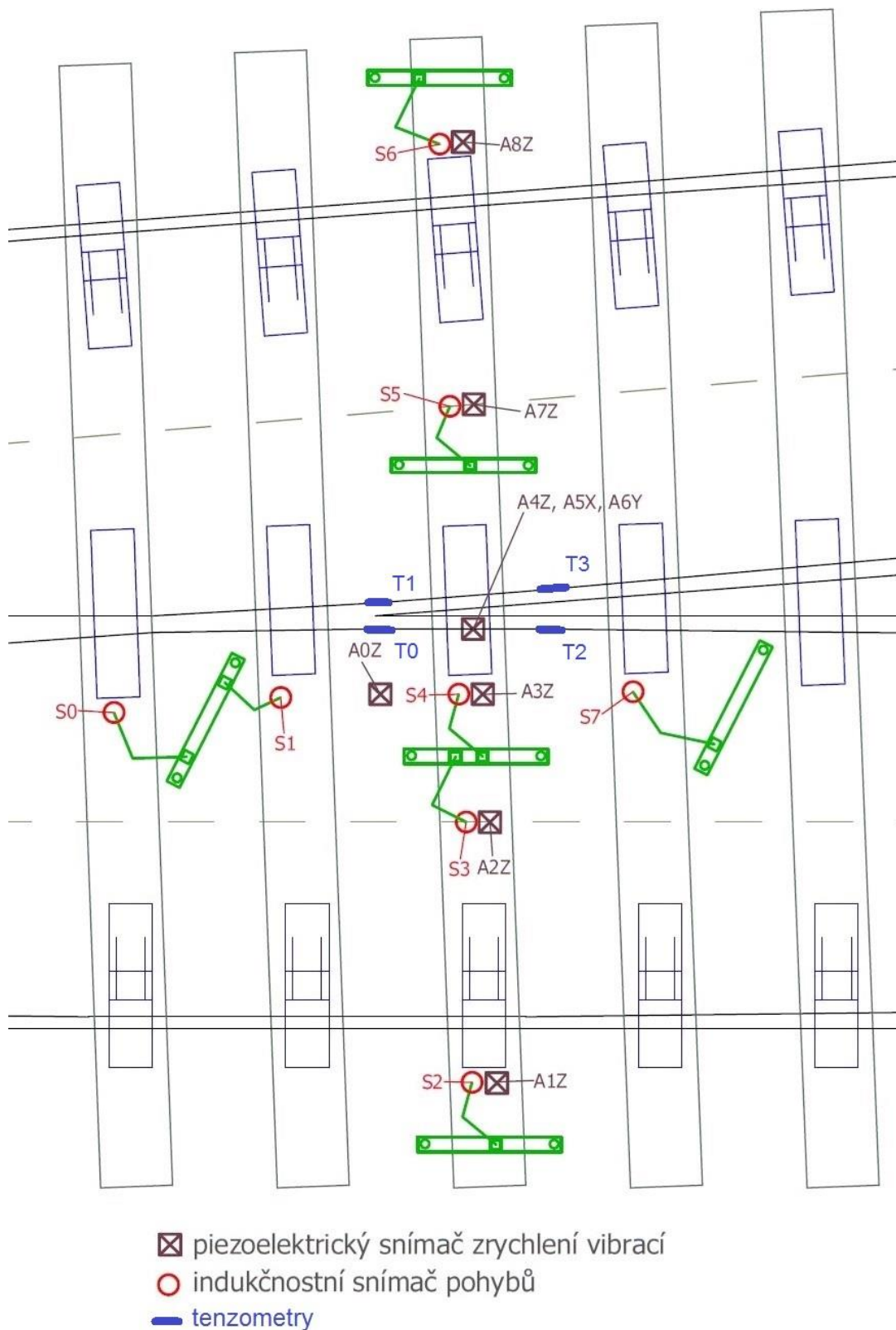
- analýzu pohybů (posunů)
- šíření vibrací
- analýze silového působení a napětí

### 4.4.1 Analýzu pohybů (posunů) konstrukce

První etapa zahrnuje měření pohybového chování, teda svislých posunů, konstrukce vybraných částí výhybky: konkrétních pražců v srdcovce a výměně a podél srdcovky a výměny. Posun se měří v metodice pomocí indukčnostních snímačů délek - přímé měření délek. Nevýhodou tohoto použitých čidel je realizace pevného bodu k uchycení snímačů.

Měřenou veličinou je časový průběh výchylky kmitání. Výhodou této metody je, že je možné využít kvalitních snímačů dráhy s dobrou linearitou a také skutečnost, že není nutné provádět žádné přepočty. Snímače délky jsou uchyceny na tzv. vztažný (srovnávací) bod.[7]

Vztažný srovnávací bod je rám, který se skládá z dvou tyčí (délka 80 cm a průměr 20 mm), zatlučenými do kolejového lože a ocelovým nosníkem délky 64 cm, který je připevněn k ocelovým tyčím. Osová vzdálenost mezi tyčemi je navržena 60 cm, v kolejovém loži jsou zatlučeny do hloubky 65 cm. [7] V metodice měření byly vybrány dvě významné části – srdcovková a výměnová. Metodika poskytuje měření dynamických jevů ve výměnové části a srdcovkové. Pro moje práce je důležitější srdcovková část a proto budeme rozebírat umístění snímačů jenom v této části. Schéma rozmístění snímačů použitých pro měření a analýzu pohybové chování je možné vidět z obrázků Obr. 4.4.



Obr. 4.4 Schéma rozmístění snímačů [7]

Celkem je umístěné 8 snímačů posunu v srdcovkové části ve tvaru „kříže“, abych zachytil stav v nejdůležitějších místech srdcovky. Čtyři snímače (S0, S1, S4 a S7) jsou umístěny podél hlavní části – srdcovky, takové umístění poskytuje



možnost vykreslit průhybovou křivku, která vzniká při průjezdů vlakových souprav podél srdcovky. Samozřejmě že největší zatlačení důsledně pohyb je u pražce přímo pod srdcovkou, tento jev potvrzený velkým počtem měření. Taky je možné říct, že takové umístění snímačů poskytne nám informace o pohybovém chování pražců podél celé srdcovky.

Podél srdcovky snímače jsou nainstalované ve směru proti hrotu srdcovky (Obr. 4.) takto:

- S0 je umístěn na druhý pražec před srdcovkou;
- S1 je umístěn na první pražec před srdcovkou;
- S4 je umístěn na pražec pod srdcovkou;
- S7 je umístěn na první pražec za srdcovkou;

Další část snímačů je umístěná podél výhybkového pražce, na který padá největší zatížení od dynamického rázu, je to pražec pod srdcovkou, proto je důležité sledovat jeho pohybové chování.

Snímače S2, S3, S4, S5 a S6 v dané metodice jsou rozmístěny po délce výhybkového pražce pod srdcovkou tak, aby sledovaly jeho pohybové chování. Snímače S2 až S6 byly rozmístěny na pražec přímo pod srdcovkou v kolmém směru k ose koleje, to znamená podél pražce. Jde o nejvíce zatížený výhybkový pražec, kde kolo přechází z křídlové kolejnice na hrot srdcovky a naopak. Podotkněme, že snímače S2 a S6 jsou umístěny na hlavě pražce, S3 – umístěn v ose přímé větve, S4 – umístěn v blízkosti hrotu srdcovky v přímé větvi, S5 – umístěn v ose odbočné větve. Z realizovaných měření a analýz bylo ověřeno, že v místě kolejnic a srdcovky se pod pražcem často vytváří volné prostory, což je způsobeno zatěžováním od dvojkolí projíždějících vlakových souprav. Z tohoto důvodu je snímač pohybů S4 umístěn v blízkosti srdcovky výhybky. Pokud se výhybkou jezdí převážně v přímém směru a odbočný směr není příliš vytížen, může dojít i k nežádoucímu převýšení výhybkového pražce, případně k jeho nadzvedávání při průjezdu vozidla. Díky tomuto rozmístění snímačů je možné všechny tyto významné jevy zachytit. Vyhodnocení dat ze snímačů rozmístěných

po délce pražce je obdobné jako u snímačů po délce srdcovky. Základním výstupem jsou grafy svislých pohybů pražce v závislosti na čase pojezdu. Opět je možné sestavit jednotlivé křivky pohybu pražce při průjezdu vozidla výhybkou. V každé pozici se předpokládá využití snímačů posunů s vestavěnou pružinou s rozsahem zdvihu 10 mm. Snímače posunu S0, S1, S2, S4, S6 a S7 jsou umístěny vždy v ose pražce a 220 mm od osy kolejnice, pokud to nebude možné, pak co nejbližší na ose pražce k výše popsanému místu (viz Obr. 4.4). Snímače S3 a S5 jsou v ose kolejí a na ose pražce (viz Obr. 4.4). [7]

Tak že rozmístění snímačů „křížem“ ukáže nám jak chová se celá srdcovková část při průjezdu vlakových souprav, taky ukáže jak je podepřený hlavní pražec pod srdcovkou.

Vzhledem k použití indukčnostních snímačů délky se dá předpokládat, že frekvenční obsah naměřeného signálu nebude příliš bohatý, proto se u této části metodiky nepředpokládá frekvenční analýza. [7]

#### **4.4.2 Analýza pohybového chování konstrukce**

Nejzajímavějším místem z hlediska dynamických zatížení je srdcovková část, podotkněme, že se jednalo o pevnou srdcovkovou část. V této části, oproti minulé části, snímače rozmístěny hlavně tak, abych byla možnost sledování šíření vibrací na přechodu z křídlové kolejnice na hrot srdcovky. Dále je patrně popsán proces průjezdů kola vlaku srdcovkovou částí a popsán model šíření vibrace při tom průjezdu.

Při přejezdu kola vlaku přes žlábek mezi křídlovou kolejnicí a hrotem srdcovky dochází, vzhledem ke stavu geometrie přechodu, k většímu či menšímu rázu. Po nárazu kola se od povrchu srdcovky šíří vibrační energie směrem dolů k relativně tuhé podkladnici a pražci, na kterých je srdcovka uložena, dále je pak vibrační energie přenášena z pražce do šterkového lože. Malá část energie je zachycena vnitřním tlumením samotné srdcovky, další malá část je zachycena

podkladnicí a podložkou pod hrotem srdcovky, podložkou pod podkladnicí a také pražcem. Vzhledem k tomu, že celý systém je poměrně tuhý, je nemalá část přenesena až do šterkového lože a podloží. Zde dochází k namáhání ostrých hran šterkového lože a ty se začínají obrušovat. Vzniklé jemnozrné části nepříznivě působí na soudržnost zrn a pod pražcem se začnou vytvářet volné prostory. Z tohoto hlediska je důležité zabývat se šířením vibrací ze srdcovky až do šterkového lože, aby bylo možné navrhnout vhodná opatření ke snížení namáhání šterkového lože.[7]

V rámci této metodiky, pro snímání vibrací byly zvoleny akcelerometry. Snímače zrychlení kmitání jsou v rámci instalované tak, aby byly schopny zachytit šíření vibrační energie ve významných částech konstrukce. Metodika předpokládá využití jednoho tříosého snímače zrychlení kmitání a šesti jednoosých snímačů zrychlení kmitání (Obr. 4.4.1).

Tříosý snímač umístěný na patě křídlové kolejnice umožní sledovat velikost dynamického rázu, který působí na srdcovku výhybky (A4Z, A5X, A6Y). Ve svislém směru (A4Z) snímač zachytí velikost svislé složky dynamického rázu na srdcovku, resp. část, která bude přenesena do paty křídlové kolejnice. V podélném směru (A5X) zachytí velikost podélné složky dynamického rázu přenesené do paty křídlové kolejnice a v příčném směru (A6Y) boční rázy od dvojkolí. Další snímače jsou umístěny tak, aby bylo možné vystihnout šíření dynamického rázu ze srdcovky výhybky přes pražec až do šterkového lože (A3Z, A0Z) a šíření vibrační energie pražcem (A1Z, A2Z, A3Z, A7Z a A8Z). Metodika zahrnuje umístění snímačů následovně - tříosý snímač (A4Z, A5X, A6Y) na patě křídlové kolejnice pod srdcovkou, jednoosý snímač A3Z na pražci pod hrotem srdcovky, A0Z – na tyči, která je zapuštěna do šterkového lože v blízkosti hrotu srdcovky. Její délka je 80 cm a je zatlučena do šterkového lože do hloubky 65 cm, průměr tyče je 20 mm. Tyč slouží jako vlnovod. Snímače A1Z, A2Z, A3Z, A7Z a A8Z jsou umístěny přímo na pražci pod hrotem srdcovky výhybky a umožní sledovat šíření vibrační energie pražcem. [7]

Hlavní pražec pod srdcovkou pod srdcovkou je po své délce v jednotlivých místech různě dynamicky namáhán. Snímače umístěné v ose koleje nám poskytnou představu, jak velká část dynamického zatížení se přenese pražcem až do osy koleje. Při zřizování železniční dopravní cesty podbíjen pražec zejména v oblasti jeho hlav, ale pod hlavami pražců tvoří se volné prostory vlivem provozu. V důsledku, je pražec podepřen v ose koleje. Z tohoto důvodu je důležité začlenit snímače na hlavy pražců. Umístění snímačů v metodice bylo zvoleno takto:

- A0Z na tyči ve štěrkovém loži
- A1Z za hlavou pražce v přímé větvi
- A2Z v ose přímé větve
- A3Z na pražci v blízkosti hrotu srdcovky
- A4Z, A5X, A6Y na patě křídlové kolejnice v přímé větvi výhybky
- A7Z v ose odbočné větve
- A8Z za hlavou pražce v odbočném směru

Snímače A1Z, A3Z, A8Z jsou umístěny 200 mm od osy kolejnice a v podélné ose pražce (viz Obr. 4.4.1). Snímač A0Z je v ose mezipražcového prostoru 200 mm od osy kolejnice (viz obr. 4.4.1). Tříosý snímač (A4Z, A5X, A6Y) je umístěn co nejbližší uzlu upevnění na patě křídlové kolejnice (viz obr. 4.4.1). Snímače A2Z a A7Z jsou umístěny v ose kolejí a na ose pražce (viz Obr. 4.4.1). Metodika předpokládá kostkové jednoosé a tříosé snímače s rozsahem  $700 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  v poloze na pražcích,  $7000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  v umístění na kolejnicích a srdcovce a  $70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  ve štěrkovém loži. Snímané frekvenční pásmo je v rozsahu minimálně 1 Hz až 1 kHz. Jsou doporučeny snímače typu ICP a TEDS, tedy takové, které mají vestavěný zesilovač s proudovým napájením 4 mA a vestavěnou paměť s údaji pro jednodušší a rychlejší instalaci. [7]

### 4.4.3 Měření deformace (napětí) v konstrukci

Metodika zahrnuje v sobě část, která věnuje měření napětí v konstrukci. Moje práce nezahrnuje sledování a hodnocení napětí ve výhybkové konstrukci, proto tuto část já popíšu zkráceně. Certifikovaná metodika [7] navrhuje sledování deformací a silového působení pomocí tenzometrických snímačů. Jak je vidět z obr. 4.4.1 čtyři tenzometrické snímače jsou nainstalované v okolí srdcovky.

Při přechodu kola z křídlové kolejnice na hrot srdcovky (případně naopak) kolo nejprve „narazí“ do klínu hrotu srdcovky, kde vzniká velké kontaktní napětí, po tomto kontaktu dochází ke změně hybnosti neodpružené hmotnosti a ta je přenesena na celý systém včetně sousedních kolejnic, podložek pod kolejnicemi, pražců i pražcové podloží. S ohledem na stav napjatosti, tento proces ovlivňuje patu srdcovky a kolejnice. Pro stanovení životnosti srdcovky se zpravidla uvažuje právě toto napětí jako klíčové. Zároveň je potřeba počítat s pojížděním srdcovky vlakovými soupravami po hrotu a proti hrotu. [7]

Kvůli uvedeným podmínkám tenzometrické snímače nainstalované mezi pražcem pod hrotem srdcovky a jedním pražcem za ním z jedné strany a z jiné strany mezi pražcem pod hrotem srdcovky a jedním pražcem před srdcovkou. Před srdcovkou jsou umístěny T0 a T1, za srdcovkou T2 a T3. Metodika doporučuje před měřením staticky kalibrovat tenzometry z důvodu vypočtu velikost kolové síly. Metodika předpokládá využití foliových odporových tenzometrů.

Další pokyny a doporučení ohledně této části:

- doporučuje se aplikace tenzometrů typu 1-LY11-6/120 (výrobce HBM, Německo);
- doporučeno pro nalepení je jednosložkové lepidlo Z70;
- na nainstalované tenzometry je nezbytné aplikovat krycí tmel (např. ABM75 – silikonový tmel s hliníkovou fólií);
- doporučuje se nainstalované tenzometry zapojit třívodičově do čtvrtmostů k příslušné měřicí ústředně;
- je nutné zjištěné hodnoty poměrných deformací je nutné přepočítat na hodnoty mechanického napětí podle vztahu:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \text{ [Pa]},$$

kde je,  $\sigma$  ... mechanické napětí [Pa];

$E$  ... Youngův modul pružnosti, uvažováno  $E = 2,1 \cdot 10^{11}$  Pa;

$\varepsilon$ ... měřená poměrná deformace [-].

## 5. Návrh vlastního měření

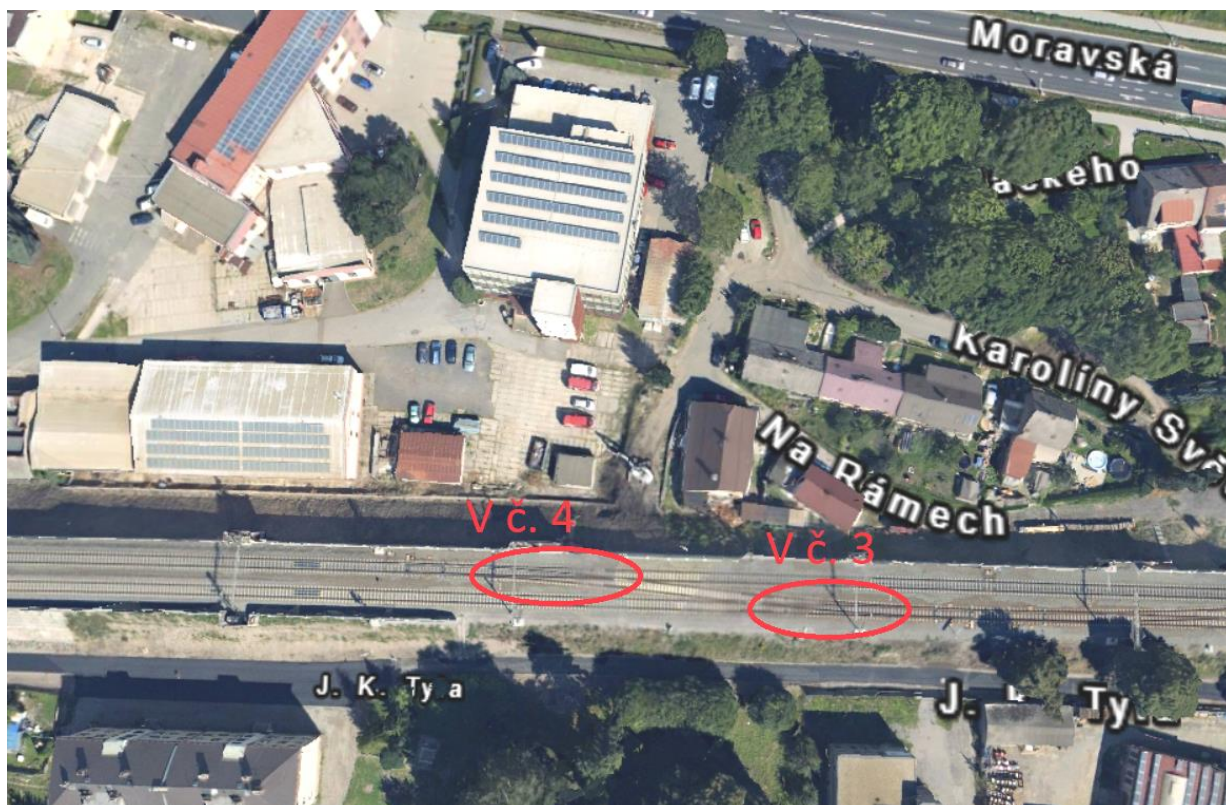
Popsaná výše certifikovaná metodika [7] měření dynamických účinků ve výhybkách a výhybkových konstrukcích, která je ověřená velkým počtem zkoušek a měření za plného provozu (in-situ), poskytuje nám komplexní informace o stavu měřené konstrukce a její součásti při průjezdu vlaků. Rozhodně jde o univerzální metodiku a dá jí použít ve všech výhybkových konstrukcích, zavedení této metodiky založilo novou větev v dopravním měření. Dohromady s tím metodika má své nevýhody, získání dat vyžaduje zapojení velkého počtu čidel a proto časové ztráty na přípravu a instalace měřicích řetězců dost velké, potřeba velkého počtu odborníků na realizaci měření in-situ, taky je nutné podotknout velké náklady na realizaci měřické kampaně. Vzhledem k výše uvedeným nevýhodám, měření výhybkových konstrukcí nedá se provádět často, v některých případech vůbec. Vývoj nestojí na místě a za nějakou dobu bude navrženo měřicí systém pro měření in-situ v reálném čase se vzdáleným ovládním a přenosem dat do nadřazeného systému. Do té doby železnice potřebuje dočasné řešení.

Proto jedním z hlavních cílů práce je navrhnout jednoduchou metodiku měření, který bude vyhovovat požadavku menších nákladů, menší náročností, ale na druhou stranu bude poskytovat dostatečně vypovídající charakteristiky, které poskytnou dostačující informace, aby bylo možné získat představu o stavu a chování výhybkových konstrukci pod vlivem zatížení od vlaku.

V této kapitole chtěl bych rozebrat můj návrh zjednodušené metodiky měření srdcovkové částí a popsat vlastní měření za plného provozu.

## 5.1 Popis lokality měření

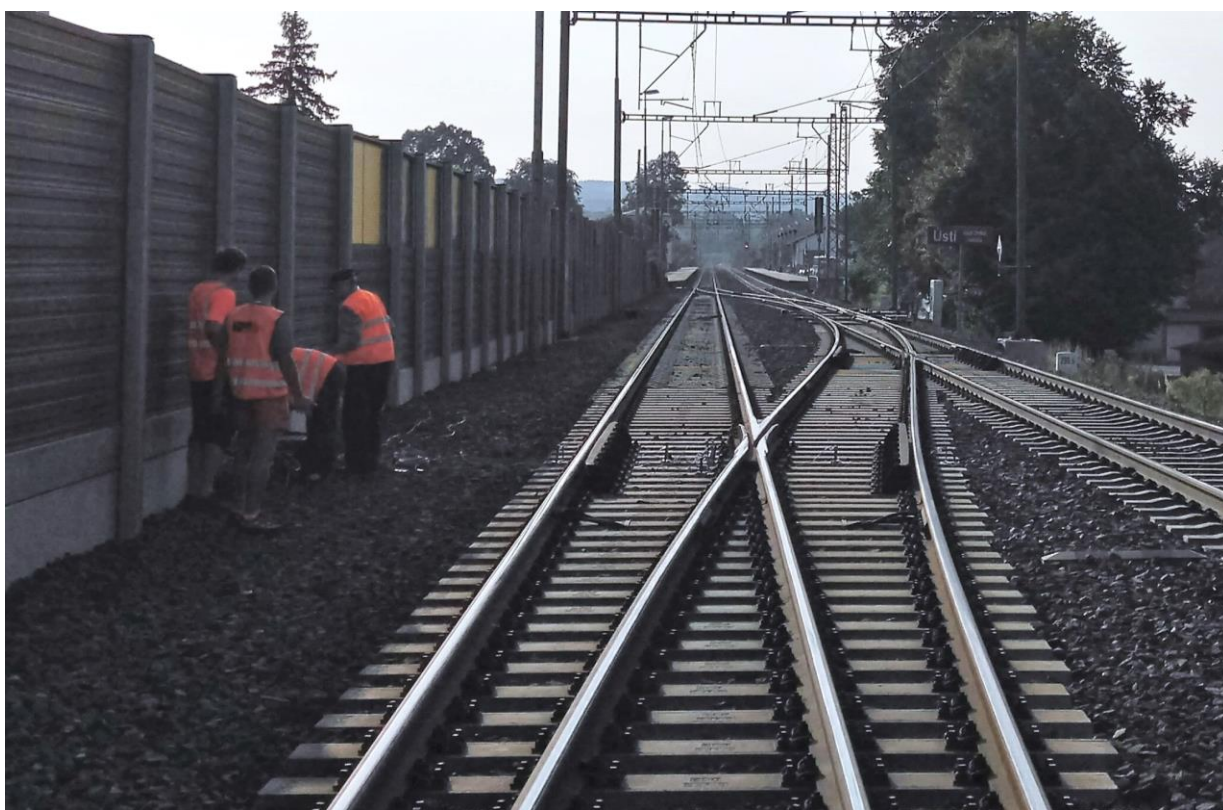
Obě vybrané výhybky se nachází na třebovském zhlaví žst. Ústí nad Orlicí (viz Obr. 5.1.1). Obě výhybky byly vyrobeny a vloženy do koleje v srpnu roku 2014, jsou umístěny ve vysokém násypu. Pod výhybky byly v několika vybraných řezech instalovány tlakové snímače. Obě výhybky byly měřeny i porovnány na základě certifikované metodiky [7] měření dynamických účinků na železničním svršku i v pražcovém podloží. Výhybky č. 3 a 4 mají stejnou štíhlost (1:12 – 500), obě jsou většinou vlaků pojížděny po hrotu a mají zcela stejné srdcovky (tvar svršku UIC 60, typ srdcovky ZPT – monoblok). Výhybka č. 4 (Obr. 5.1.3) má klasické upevnění pomocí žebrových podkladnic na betonových pražcích s upevněním Skl. 24, které je dnes nejvíce používáno pro výhybky v hlavních kolejích a je umístěna v koleji č. 2. Výhybka č. 3 (Obr. 2) má nový typ upevnění UNO 3718 pomocí žebrových podkladnic na betonových pražcích se svěrkami Skl 24 a je umístěna v koleji č. 1. Hlavní rozdíl mezi upevněními je především v podložce pod patu kolejnice.



Obr. 5.1.1 Situace části zhlaví žst. Ústí nad Orlicí



*Obr. 5.1.2 Pohled na výchybku č. 3 v žst. Ústí nad Orlicí*

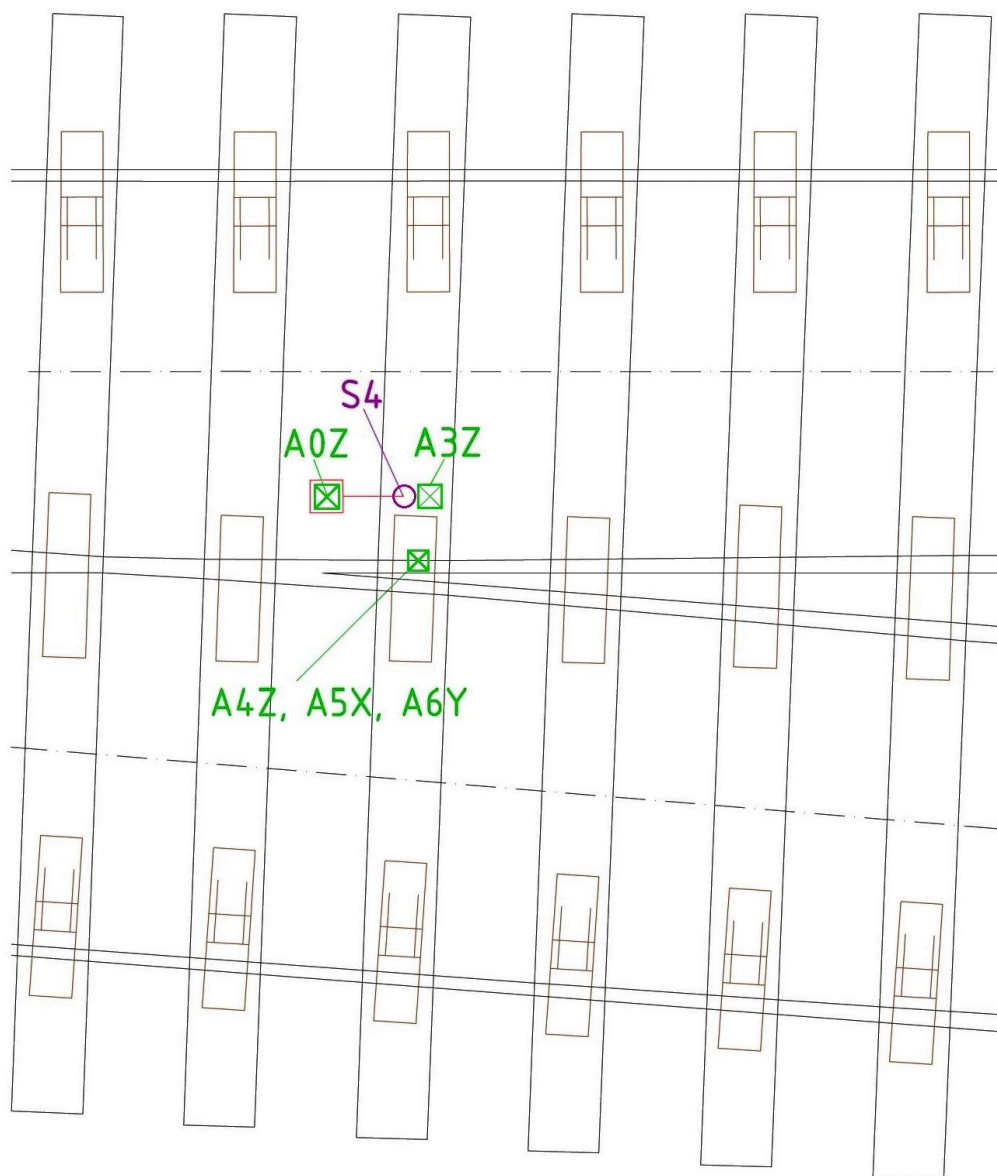


*Obr. 5.1.3 Pohled na výchybku č. 4 v žst. Ústí nad Orlicí*



## 5.2 Měřicí sestava a parametry měření

Navřená mnou zjednodušená metodika vychází celkové z certifikované metodiky [7], všechny snímače, postupy a řetězec – vše podle vícekrát vyzkoušené metodiky. Proto získaná data lze porovnávat s výsledky, které byli provedeni na základě plné metodiky. Rozdílem bude jen počet používaných snímačů. Schémat umístění čidel a jich očíslování je patrně vidět na Obr. 5.2.1.



- ☒ piezoelektrický snímač zrychlení vibrací
- indukčnostní snímač pohybů

Obr. 5.2.1 Schéma umístění snímačů, zjednodušená metodika

Očíslování jsem schválně zachoval stejně jako v plně metodice pro případ porovnání změřených signálů. Z obrázku je vidět, že důraz byl dělán na srdcovkovou část z možnosti zachytit nejdůležitější signály pod vlivem zatížení. Celá sestava snímačů se skládá z jednoho indukčního snímače posunu S4, třech piezometrických snímačů (A0Z, A3Z, A4Z), přičemž jeden z nich je tříosový (A4Z/A5X/A6Y). Tenzometry tato zkrácená metoda nezahrnuje.

Mnou zjednodušená metodika vychází z certifikované metodiky [7], vhodně redukuje počet použitých snímačů, ale zachovává postupy a pokyny k vybrání snímačů: indukční snímač značky Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH typ WA-10 T, včetně dvou tyčí, které tvoří rám pro snímač, rozsah měření 10 mm; dva jednoose piezometrické snímače (akcelerometry) značky Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement typu B001, B004 a jeden tříosový piezometrický snímač typu 4524 B001. Rychlosti vlaků byly měřeny pomocí Radar Speed Bushnell 10-1900. Instalování snímačů bylo takové, abych nechat všechny nejbližší do srdcovky z plné metodiky (viz Obr. 5.2.2):

- indukční snímač S4, který umístěn co nejbliž k srdcovce;
- piezometrický snímač A0Z na tyči ve štěrkovém loži;
- piezometrický snímač A3Z na pražci v blízkosti hrotu srdcovky;
- piezometrický snímač na patě křídlové kolejnice v přímé větvi výhybky;



*Obr. 5.2.2 Náhled umístění snímačů, zjednodušená metodika*

Takové umístění snímačů dá možnost zachytit nejdůležitější dynamické jevy, jak se šíří vibrace od povrchu srdcovky směrem dolů k relativně tuhé podkladnici a pražci, na kterých je srdcovka uložena, dále je pak vibrační energie přenášena z pražce do šterkového lože v srdcovkové části. Zároveň dá možnost ušetřit čas a náklady na měření a provádět měření častěji pro získání vyšší míry statistického hodnocení.

Všechno zařízení a součásti měřického řetězce byly zkontrolovány a nachystány den dopředu. V rámci této práce se měření provádělo vždy jednou na každé výhybce a to pod vedením prof. J. Smutného. Měření se uskutečnila ve dnech 28. 8. 2018 (výhybka č. 3) a 30. 8. 2018 (výhybka č. 4). Seznam změřených vlaků je vidět v tabulkách Tab. 5.2.3 a Tab. 5.2.4. Fotodokumentace a všechny záznamy z měření je součástí této práce a jsou přílohou.

Měření Ústí nad Orlicí 28.8.2018 - výhybka č. 3					
měření č.	čas	rychlost [km/h]	souprava	špatně zapojeno	poznámky
1	9:16	130	380	S7	
2	9:30	130	Leo Express		
3	9:33	30-45	N 140		<i>souběh vlaků</i>
4	9:40	100-105	660 Inter Panter		
5	9:49	70-60	ŘV + 162		
6	9:53	29	151		
7	10:12	127	RailJet		
8	10:42	55	Leo Express		<i>spojkou</i>
9	10:44	103	RegioJet		
10	10:46	71	371	S7	
11	10:49	120	361		
12	10:52	97-102	N 363	S7	
13	11:01	156	Pendolino		
14	11:13	120	RegioJet		
15	11:20	118-122	380		
16	11:39	102-111	660 Inter Panter		
17	11:48	80-61	471 City Elefant		
18	11:51	79-60	151		
19	12:13	118	RailJet		
20	12:31	87	Loko 122		
21	12:41	133	RegioJet		
22	12:43	63	371		
23	12:48	72-60	363		
24	12:51	94	361		
25	13:00	150	Pendolino		
26	13:13	131	RegioJet		
27	13:21	90	350		
28	13:43	90	660 Inter Panter		
29	13:48	130	Leo Express		
30	13:50	65-55	ŘV + 162		

Tab. 5.2.3 Seznam změřených vlaků ve výhybce č. 3

Měření Ústí nad Orlicí 30.8.2018 - výhybka č. 4					
měření č.	čas	rychlost [km/h]	souprava	špatně zapojeno	poznámky
1	8:05	122	151		<i>před kalibrací</i>
2	8:12	46	162		
3	8:18	43-53	150		
4	8:25	50	810		
5	8:27	120	RegioJet		
6	8:29	125	RegioJet		
7	8:50	56	N 131		
8	8:55	124	350		
9	8:59	130	Pendolino		
10	9:04	50	N 130		
11	9:08	120	361		
12	9:17	33-39	N 123		
13	9:20	116	RegioJet		
14	9:26	127	RegioJet		
15	9:29	88	371		
16	9:35	93	N 386		
17	9:57	130	RailJet		
18	10:09	45	162		
19	10:15	130	Leo Express		
20	10:20	37-50	151		
21	10:22	100	660 Inter Panter		
22	10:33	130	RegioJet		
23	10:47	125	380		
24	11:00	155	Pendolino		
25	11:05	81	163		

Tab. 5.2.4 Seznam změřených vlaků ve výhybce č. 4

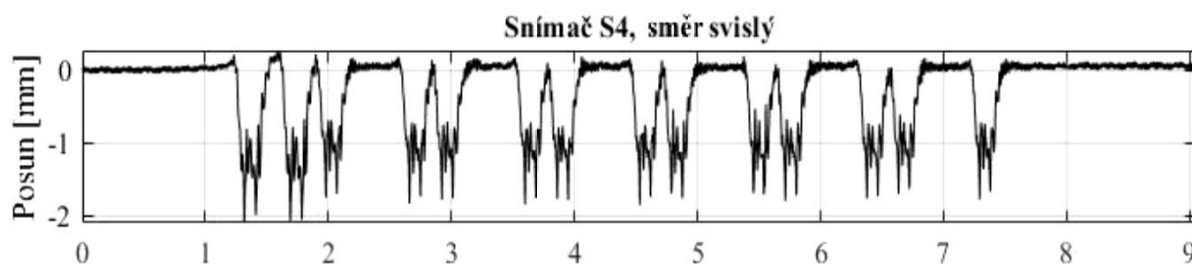
## 6. Vyhodnocení měření

Vyhodnocení měření v oblasti srdcovek na železničním svršku výhybek je rozděleno do tří částí. První část je věnována pohybovému chování konstrukcí pod zatížením projíždějícími soupravami a sleduje především zatlačení pražce. V druhé části je uvedeno vyhodnocení šíření vibrací konstrukcemi na základě analýzy dynamické odezvy od projíždějících souprav. V rámci třetí části je provedeno srovnání vybraných parametrů (zrychlení kmitání, tlaky) v rámci konstrukce pražcového podloží.

Hodnocení zatlačení pražců je realizováno pouze v časové rovině a formou vybraných parametrů (minimum - Min, maximum - Max). Vyhodnocení zrychlení kmitání je rozděleno na časovou a frekvenční oblast. V časové oblasti jsou hodnocena minima a maxima zrychlení kmitání a také efektivní hodnota zrychlení kmitání (Root Mean Square – RMS). Pro hodnocení ve frekvenční oblasti byla použita Fourierova transformace. Tabulky změřených vlakových souprav jsou součástí přílohy k měření v Ústí nad Orlicí. Abych zbytečně nehodnotil všechny vlaky, jsem odebral z obou výhybek totožní soupravy. Parametrem pro odběr byly stejný typ vlaku a stejná rychlost (nebo případně skoro stejná).

## 6.1 Vyhodnocení pohybového chování

Při vyhodnocení pohybového chování konstrukce byly nejdříve připraveny přehledové grafy pohybů pražců vedle srdcovky. U obou výhybek byly ke srovnání vybrány charakteristické vlakové soupravy. Grafy pohybového chování pražců pro tyto vlakové soupravy jsou součástí přílohové části zprávy. Graf je umístěn v levé části (čtvrtý shora) příslušného obrázku. Všechny vygenerované grafy mají stejné měřítko pro lepší vizuální srovnání. Přehledový graf pohybového chování pražce u hrotu srdcovky při průjezdu vlaku je možné vidět na Obr.6.1.1.



Obr. 6.1.1 Přehledový graf posunu pražce u srdcovky při průjezdu vlaku

Z přehledného grafu je vidět průjezd lokomotivy a šesti vozů. Největší zatlačení na pražec je -2 mm a to pod vlivem lokomotivy. Mezi nápravami jednotlivých vozů zatlačený pražec se vrací do své výchozí pozice.

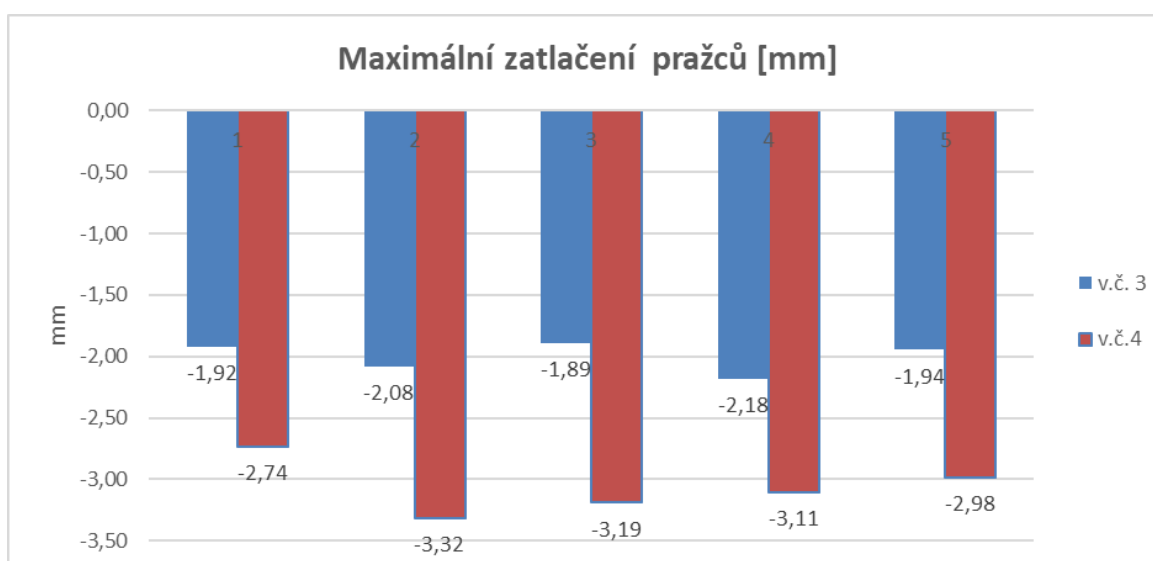
Byl vyhotoven graf pro srovnání maximálních a minimálních hodnot posunů/pohybů pražce v oblasti srdcovky (Obr. 6.1.3) pro vybrané vlakové soupravy. Vybrané vlakové soupravy typu Leo Express, Pendolino, dále

o soupravu s lokomotivou řady 380, soupravu RegioJet a Railjet. Z každého vlaku byla vybrána maximální hodnota zatlačení (Tab. 6.1.2) a z těchto byly sestaveny sloupky výhybky č. 3 (modrá) a výhybky č. 4 (červená) “průhybu“ (Obr. 6.1.3).

Maximální zatlačení pražců [mm]				
Výhybka	Č. vlaku	Loko	Rychlost [km/h]	Čidlo S4
3	29	Leo Express	130	-1,92
4	19	Leo Express	130	-2,74
3	13	Pendolino	156	-2,08
4	24	Pendolino	155	-3,32
3	1	380	130	-1,89
4	23	380	125	-3,19
3	26	RegioJet	131	-2,18
4	22	RegioJet	130	-3,11
3	7	RailJet	127	-1,94
4	17	RailJet	130	-2,98

Tab. 6.1.2 Maximální zatlačení pražců ve výhybce č. 3 a č. 4

Následující tabulka Tab. 6.1.2 a Obr. 6.1.3 udávají hodnoty maximálních zatlačení všech měřených vlaků, které jsem vybral pro porovnání. Na grafu (Obr. 6.1.3) je pak vidět největší zatlačení na snímači S4, které byly v průběhu celého dne naměřeny. Z tabulek je patrné, že při stejné skladbě vlaků jsou hodnoty zatlačení naměřené na výhybce č. 4 obecně vyšší, a to i o víc než 1 mm. Zcela je možné říct, že výhybky č. 3 a č. 4 chovají se odlišně pod zatížením stejných vlaků.



Obr. 6.1.3 Srovnání průhybu pražce pod srdcovkou výhybky

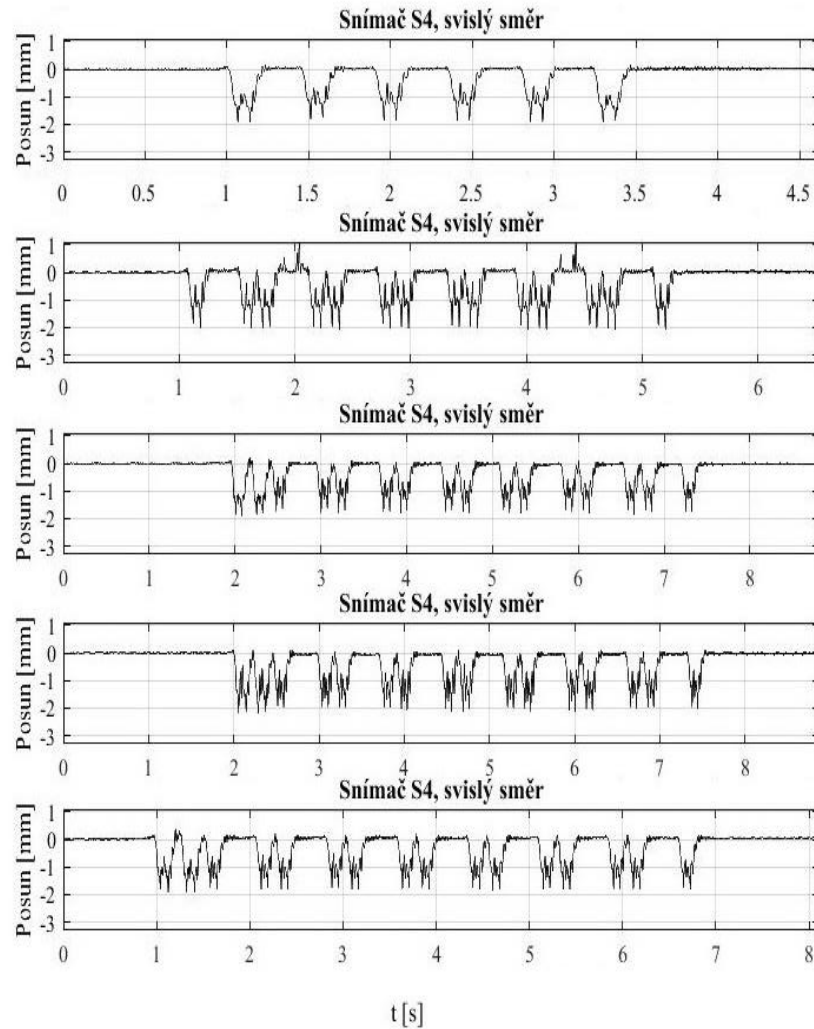
Pohybové chování pražce je podobné jako u předchozích měření na předmětných výhybkách. Ze sestavy grafů snímače S4 ve stejném měřítku (Obr. 6.1.4) je vidět, že skoro vždy největší zatlačení vykazují lokomotivy. Ucelené jednotky (Pendolino a LEO Express) mají zatlačení pražců od všech náprav prakticky stejné.

Také je vidět (Obr. 6.1.4), že k nadzvednutí pražce dochází i před průjezdem posledního podvozku každého vozu. Tedy vždy poté, co se pražec vrátí do původní polohy, pak následuje mezera mezi podvozky jednotlivých vozů a poté zdvih pražce před posledním podvozkem a poté opětovné zatlačení pražce.

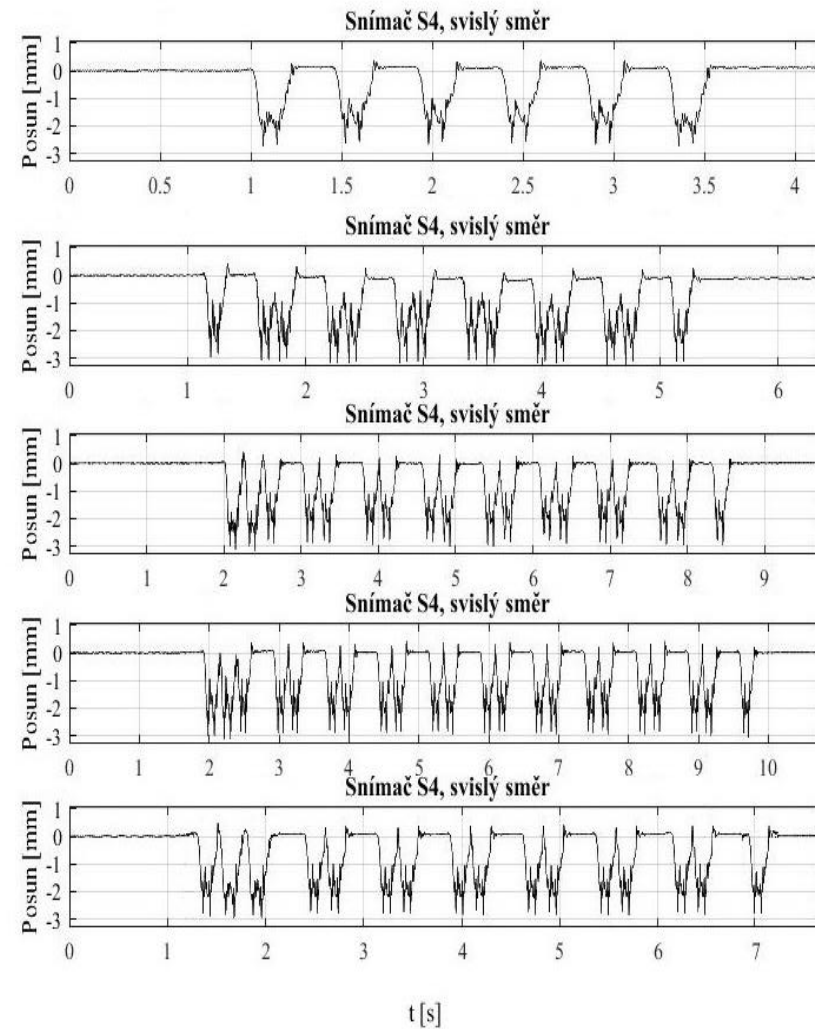
Dále je možno říct, že rozdíly mezi nejvyššími a nejnižšími naměřenými hodnotami jsou u výhybky č. 4 podstatně vyšší, než je tomu u výhybky č. 3. Zatímco na výhybce č. 3 jsou tyto rozdíly přibližně v rozmezí 0,4 – 1 mm, na výhybce č. 4 je toto rozmezí 0,6 – 1,6 mm. Z toho lze usoudit, že u výhybky č. 4 je pravděpodobně horší kontakt mezi pražci a šterkem, což se u lehčích a pomalejších souprav nemusí tak dobře projevit, nicméně těžší a rychlejší vlak pak dotlačí pražec mnohem výrazněji.



### Výh. č. 3



### Výh. č. 4



Obr. 6.1.4 Srovnání grafů průhybu pražce pod srdcovkou výhybky při průjezdů vlakových souprav, shora dolů v řádcích: LEO Express, Pendolino, lokomotiva řady 380, RegioJet, Railjet.

## 6.2 Vyhodnocení zrychlení vibrací na železničním svršku výhybek

Druhá etapa hodnocení zjednodušené metodiky zahrnuje analýzu naměřených zrychlení vibrace k srdcové části pomoci třech akcelerometrů, přičemž jeden z nich je tříosový. Akcelerometry umístěné tak, aby bylo možné sledovat šíření vibrace od srdcovky přes pražec až do šterkového lože, proto tříosý snímač vibrace umístěný na patu koleje, další jednoosý snímač byl umístěn na pražec v blízkosti srdcovky, třetí snímač instalován na ocelovou tyč sloužící jako vlnovod, která je zapuštěná do šterkového lože taky v blízkosti srdcovky.

Vyhodnocení zrychlení vibrací je rozděleno do dvou částí. Vyhodnocení v časové rovině a vyhodnocení ve frekvenční rovině. V obou rovinách bylo provedeno srovnání vybraných parametrů u obou výhybek (č. 3 a č. 4). Pro srovnání v časové rovině byly vybrány ze všech měřených vlakových souprav jen porovnatelné soupravy, tedy zejména stejného typu a jedoucí přibližně stejnou rychlostí. Pro podrobnější analýzu byly vybrány srovnatelné vlakové soupravy typu Leo Express, Pendolino, dále soupravy s lokomotivou řady 380, souprava RegioJet a Railjet. Bylo tomu tak proto, že tyto soupravy jednak projížděly přes obě výhybky přibližně stejnou rychlostí a zejména využily maximální traťové rychlosti. Ostatní vlaky projížděly výhybkami pomaleji. Pro porovnání dynamických účinků jsou zajímavější především maximální dynamické účinky, které vyvolávají nejrychlejší vlakové soupravy. Byly vytvořeny přehledové grafy. Všechny grafy vytvořené z měřených dat a jejich vyhodnocení jsou součástí přílohy. Tato je orientována zejména na vyhodnocení měřící kampaně realizované v roce 2018.

V časové oblasti byly nejprve ke všem snímačům vytvořeny grafy časového průběhu zrychlení vibrací. Obrázky jsou uspořádány tak, že vlevo je vždy časový graf zrychlení vibrací (kromě čtvrtého shora, ten je graf posunu) a vpravo je odpovídající frekvenční spektrum vypočtené pomocí rychlé Fourierovy transformace. Grafy jsou uspořádány do dvou skupin, představuje přechod vibrací

z křídlové kolejnice do šterkového lože.. Na obrázcích Obr. 6.2.4, Obr. 6.2.5 a Obr. 6.2.6 sestavení vedle sebe grafy zrychlení vibrace stejných souprav. Vždy je to tak že výhybka č. 3 je upořádána vlevo a výhybka č. 4 vpravo. Pak grafy uspořádané vzestupně shora dolů stejně tak, jak byly nainstalované snímače při měření, a to shora A4Z pak A3Z i nakonec A0Z. Všechny grafy stejné měřítko pro každý snímač. Děláno proto, abych bylo lib srovnávat vizuálně mezi sebou. Z časového průběhu zrychlení vibrací byly odečteny maximální hodnoty, minimální hodnoty a hodnoty RMS a zaneseny do tabulek. Jak již bylo zmíněno, pro porovnání bylo důležité vybrat stejné vlakové soupravy a lokomotivy projíždějící přes obě výhybky stejnou nebo velmi blízkou co možná nejvyšší rychlostí. Byly zvoleny následující soupravy: LEO Express, Pendolino, lokomotiva řady 380, RegioJet a Railjet.

Výh. č	Č. vlaku	Loko	Rychlost [km/h]	Maximální hodnoty zrychlení vibrací [m/s <sup>2</sup> ]				
				A0Z	A3Z	A4Z	A5X	A6Y
3	29	Leo Express	130	67,48	158,65	631,03	183,91	136,82
4	19	Leo Express	130	113,43	168,20	351,98	92,63	115,77
3	13	Pendolino	156	71,66	239,79	556,92	265,66	210,41
4	24	Pendolino	155	253,86	356,26	555,53	145,70	323,93
3	1	380	130	68,86	155,77	569,01	219,74	174,46
4	23	380	125	100,60	171,32	458,11	97,22	215,24
3	26	RegioJet	131	64,15	209,95	807,49	230,61	265,05
4	22	RegioJet	130	126,58	254,07	519,91	171,07	262,33
3	7	RailJet	127	71,94	157,98	547,17	200,12	173,12
4	17	RailJet	130	111,87	225,52	390,48	81,47	174,17

Tab. 6.2.1 Srovnání maximálních hodnot zrychlení vibrací u výhybky č. 3 a 4

V Tab. 6.2.1 jsou uvedeny hodnoty maximálních zrychlení vibrací, v Tab. 6.2.2 jsou hodnoty minimálních zrychlení vibrací a v Tab. 6.2.3 jsou efektivní hodnoty zrychlení vibrací, vše na vybraných porovnatelných soupravách.

Výh. č	Č. vlaku	Loko	Rychlost [km/h]	Minimální hodnoty zrychlení vibrací [m/s <sup>2</sup> ]				
				A0Z	A3Z	A4Z	A5X	A6Y
3	29	Leo Express	130	-102,02	-141,16	-653,18	-171,94	-220,13
4	19	Leo Express	130	-211,43	-155,12	-372,48	-65,66	-138,99
3	13	Pendolino	156	-153,29	-197,94	-589,97	-256,24	-235,77
4	24	Pendolino	155	-561,53	-276,45	-728,80	-127,63	-232,25
3	1	380	130	-109,86	-145,06	-488,06	-209,97	-258,33
4	23	380	125	-291,88	-206,00	-483,77	-85,53	-200,73
3	26	RegioJet	131	-138,80	-160,44	-604,44	-226,68	-251,49
4	22	RegioJet	130	-293,83	-247,84	-565,65	-217,40	-213,38
3	7	RailJet	127	-116,88	-153,33	-494,56	-185,69	-192,82
4	17	RailJet	130	-244,10	-160,99	-565,49	-109,37	-128,04

Tab. 6.2.2 Srovnání minimálních hodnot zrychlení vibrací u výhybky č. 3 a 4

Dáme pozornost nejdříve srovnání maximálních a minimálních hodnot zrychlení kmitání na přechodu z křídlové kolejnice do šterkového lože. Na křídlové kolejnici ve svislém směru (A4Z) jsou u většiny vlaků vyšší hodnoty na výhybce č. 3. U vlaku LEO Express pozorujeme tyto hodnoty až téměř dvojnásobné, u Pendolina vidíme výraznější rozdíl v minimech (kolem 130 m·s<sup>-2</sup>), u lokomotivy řady 380 naopak vidíme větší rozdíl u maxim (kolem 100 m·s<sup>-2</sup>).

U vlaku RegioJet pak je výrazný rozdíl v hodnotách maxim (kolem 300 m·s<sup>-2</sup>) a stejně tak u vlaku RailJet (kolem 150 m·s<sup>-2</sup>). Nicméně obecně lze říct, že vyšší hodnoty zrychlení vibrací na křídlové kolejnici byly naměřeny na výhybce č. 3. Na křídlové kolejnici v podélném směru (A5X) pozorujeme také vyšší hodnoty na výhybce č. 3. U vlaků LEO Express, Pendolino, RailJet i u lokomotivy řady 380 jsou tyto hodnoty i více než dvojnásobné.

Vlak RegioJet působí v podélném směru podobné zrychlení vibrací na obou výhybkách, hodnoty jsou ale i tady vyšší u výhybky č. 3. Na křídlové kolejnici v příčném směru (A6Y) už situace není tak jednoznačná, ale pořád můžeme pozorovat u většiny vlaků vyšší hodnoty zrychlení vibrací u výhybky č. 3. Je tomu tak u LEO Expressu, RegioJetu i RailJetu.

Při průjezdu Pendolina byly naměřeny vyšší hodnoty na výhybce č. 4, kromě křídlové kolejnice A4Z, tady vypadá stejně jako na výhybce č. 3, při průjezdu lokomotivy řady 380 vyšší hodnoty minim na výhybce č. 3 a vyšší hodnoty maxim na výhybce č. 4. Na pražci u srdcovky (A3Z) jsou už naměřeny vyšší hodnoty

zrychlení vibrací na výhybce č. 4. Nejmenší rozdíly jsou přitom u průjezdů LEO Expressu a největší rozdíly u průjezdů Pendolina. Mnohem důležitějším parametrem ovšem je rozdíl mezi hodnotou naměřenou na křídlové kolejnici A4Z a hodnotou naměřenou na pražci A3Z, protože tento rozdíl reprezentuje utlumení vibrací v uzlu upevnění.

Tady lze konstatovat, že většího utlumení bylo dosaženo u výhybky č. 3, přičemž u LEO Expressu je to až na třetinu hodnoty na kolejnici, u RegioJetu a Railjetu je to asi na polovinu hodnoty na kolejnici a u Pendolina a lokomotivy řady 380 sledujeme utlumení asi na dvě třetiny hodnoty na kolejnici. Ve šterkovém loži (A0Z) jsou hodnoty vyšší u výhybky č. 4, přičemž rozdíl často dosahuje i více než dvojnásobku. Vyšší hodnoty na křídlové kolejnici ve svislém směru (A4Z) a v podélném směru (A5X) mohou indikovat mírně vyšší ojetí srdcovky výhybky č. 3. Výrazně vyšší hodnoty zrychlení vibrací na pražci u srdcovky (A3Z) a ve šterkovém loži (A0Z) znamenají, že do pražce a šterkového lože se přenáší více špičkových hodnot na výhybce č. 4. Uzel upevnění UNO 3718 na výhybce č. 3 tedy lépe tlumí špičkové hodnoty zrychlení kmitání.

Další část je zaměřena na šíření zrychlení vibrací z pražce pod srdcovkou do šterkového lože z hlediska minimálních a maximálních hodnot. Snímač u srdcovky, který fixuje vibrace v šterkovém loži v přímé větvi výhybky (A0Z) má hodnoty vyšší na výhybce č. 4, maxima někdy dosahující až trojnásobku hodnot na výhybce č. 3. Tyto největší rozdíly pozorujeme u Pendolina pak u LEO Expressu a RegioJetu. Minima u všech souprav minimálně dvojnásobní na výhybce č. 4, ve případě z Pendolino dochází skoro k čtyřnásobnému rozdílu, u 380 pak skoro trojnásobnému.

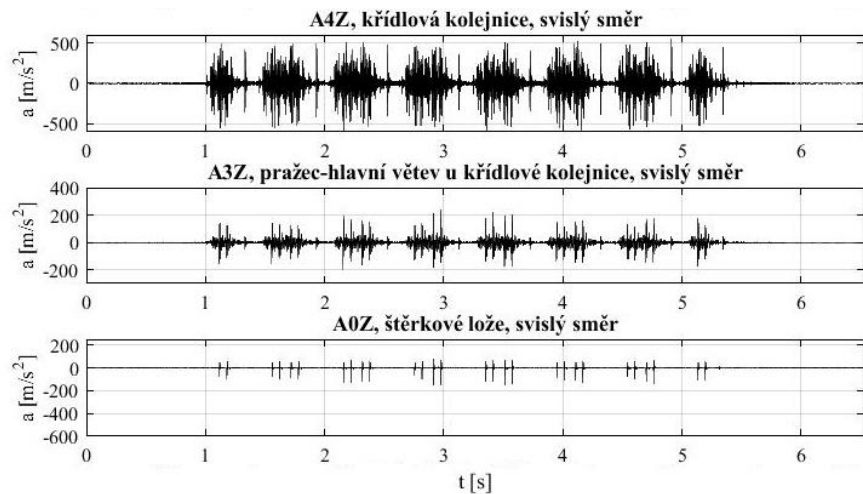
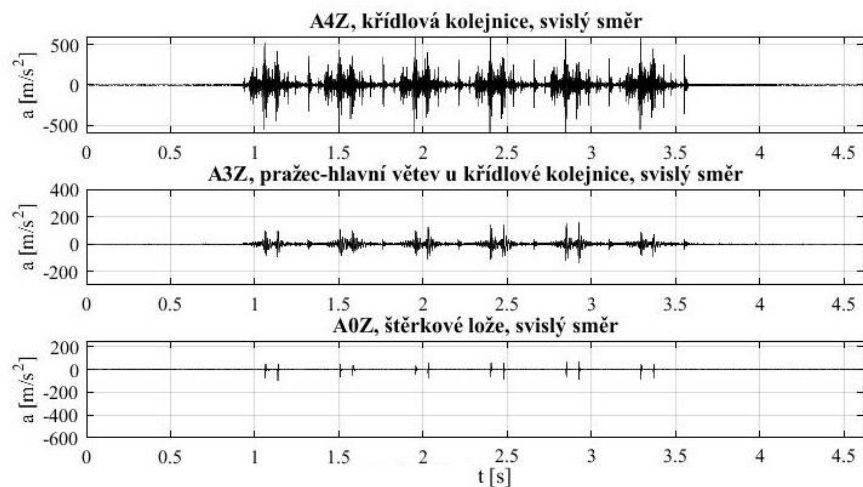
U lokomotivy řady 380 a RailJet už jsou rozdíly mezi výhybkami méně výrazné v maximálních hodnotách, nicméně stále jsou vyšší hodnoty na výhybce č. 4. Je nutné říct, že většinou na všech snímačích jsou hodnoty minim a maxim vyšší u většiny vlaků na výhybce č. 4.

Výh. č.	Č. vlaku	Loko	Rychlost [km/h]	Efektivní hodnoty zrychlení vibrací [m/s <sup>2</sup> ]				
				A0Z	A3Z	A4Z	A5X	A6Y
3	29	Leo Express	130	4,58	14,47	57,87	16,00	17,52
4	19	Leo Express	130	6,73	20,20	40,43	7,79	12,73
3	13	Pendolino	156	7,88	23,16	87,40	25,57	28,31
4	24	Pendolino	155	19,96	41,90	75,07	14,27	26,92
3	1	380	130	6,23	18,09	65,66	20,60	20,23
4	23	380	125	5,90	22,39	47,20	9,71	16,43
3	26	RegioJet	131	5,65	19,82	72,30	23,67	22,43
4	22	RegioJet	130	7,99	28,81	57,12	12,45	19,26
3	7	RailJet	127	6,98	19,21	62,69	18,25	19,94
4	17	RailJet	130	9,28	27,25	49,11	8,80	17,08

Tab. 6.2.3 Srovnání efektivních hodnot zrychlení vibrací u výhybky č. 3 a 4

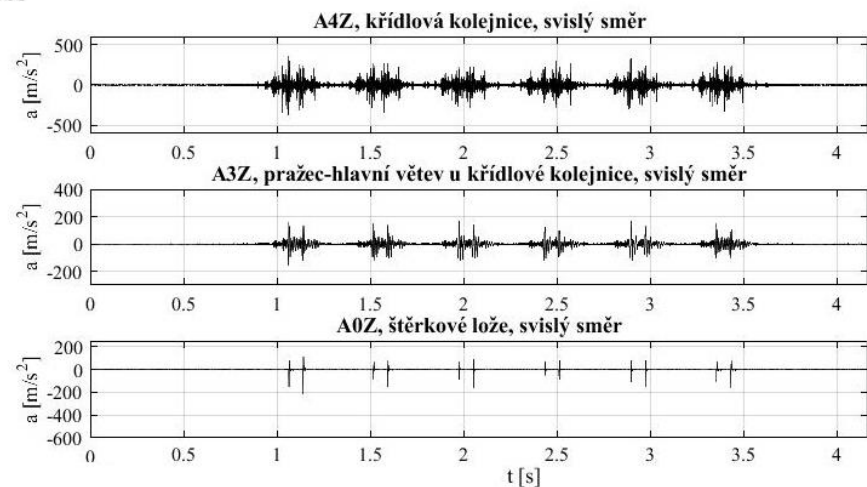
Pak je nutné podotknout, že na koleji pod hrotem srdcovky hodnoty na výhybce č. 3 jsou vyšší v podélném a příznmém směru, v některých případech skoro dvakrát. Z hlediska šíření minimálních a maximálních hodnot zrychlení kmitání pražcem pod srdcovkou je tedy zřejmé, že na výhybce č. 4 jsou hodnoty přece jen vyšší, což souvisí i s vyššími zatlačeními pražce pod srdcovkou č. 4. Celkově lze říci, že uzel upevnění výhybky č. 3 lépe tlumí špičkové hodnoty zrychlení kmitání. Tabulka efektivních hodnot Tab. 6.2.3 potvrzuje výše uvedené závěry z analýzy minimálních a maximálních hodnot zrychlení vibrací.

### Výhybla č. 3

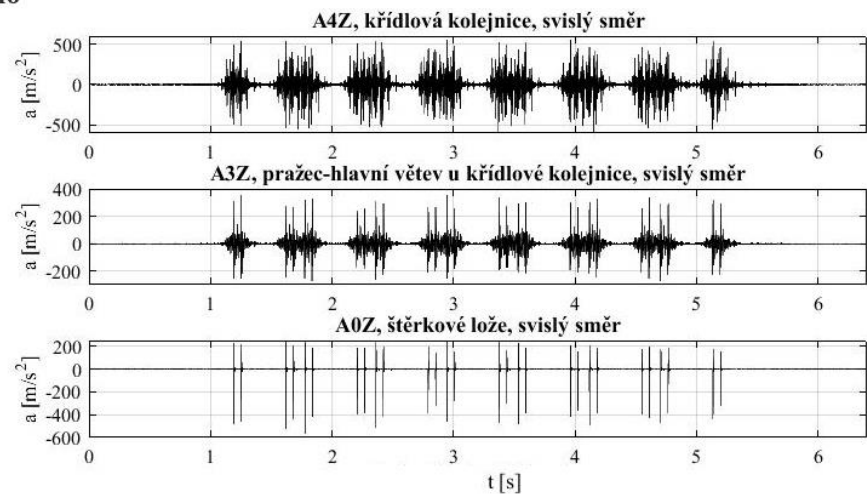


### Výhybla č. 4

#### Leo Express

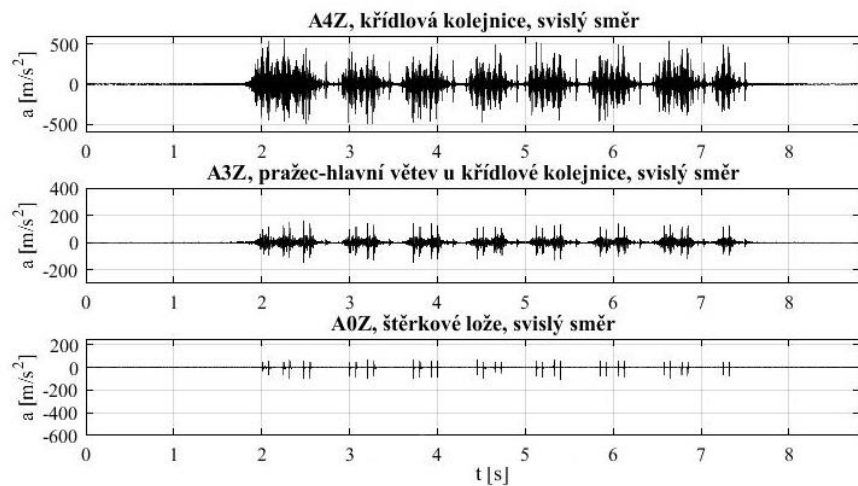


#### Pendolino



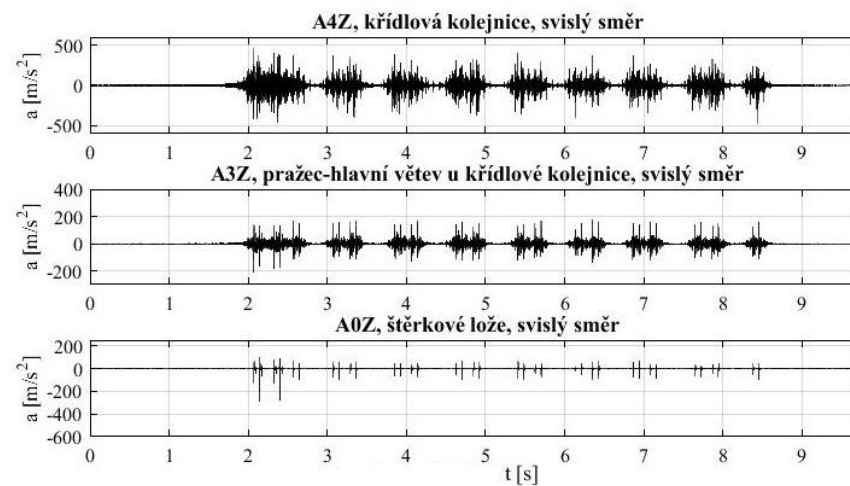
Obr. 6.2.4 Srovnání grafů zrychlení vibrací, výhybky č. 3 a 4 při průjezdu vlakových souprav LEO Express a Pendolino

### Výhybla č. 3

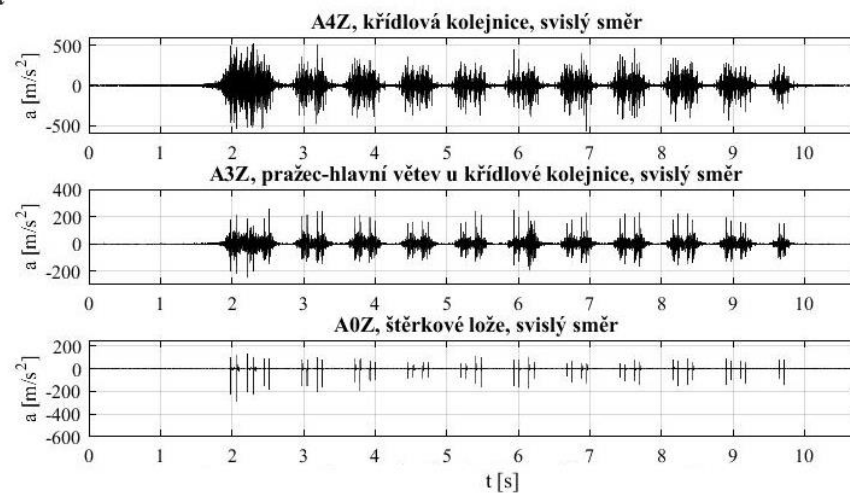


380

### Výhybla č. 4



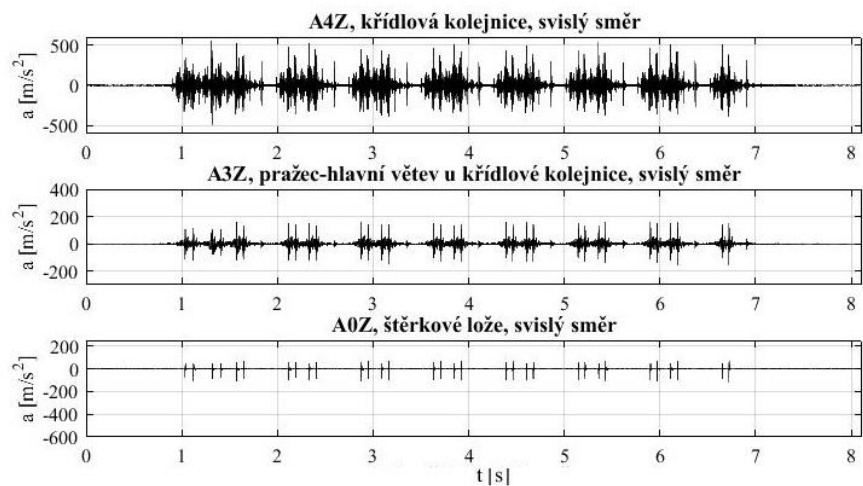
RegioJet



Obr. 6.2.5 Srovnání grafů zrychlení vibrací, výhybky č. 3 a 4 při průjezdu vlakových souprav 380 a RegioJet

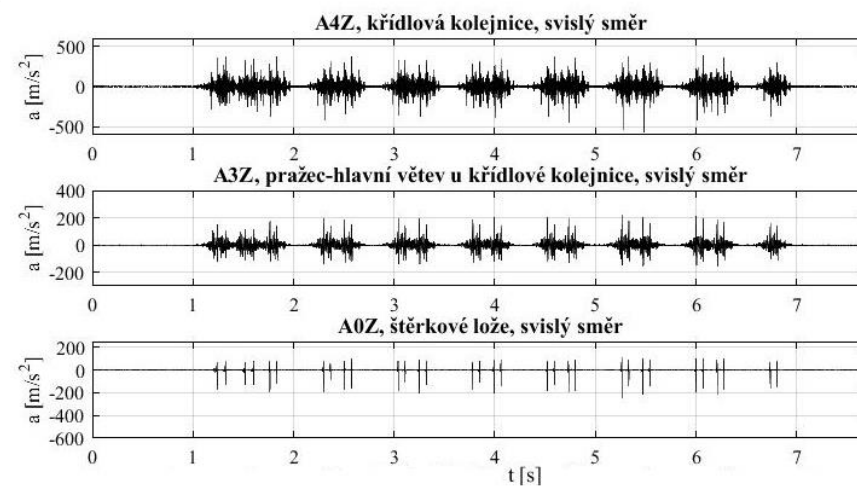


### Výhybla č. 3



### Výhybla č. 4

RailJet



Obr. 6.2.6 Srovnání grafů zrychlení vibrací, výhybky č. 3 a 4 při průjezdu vlakových soupravy RailJet

### 6.3 Vyhodnocení ve frekvenční rovině

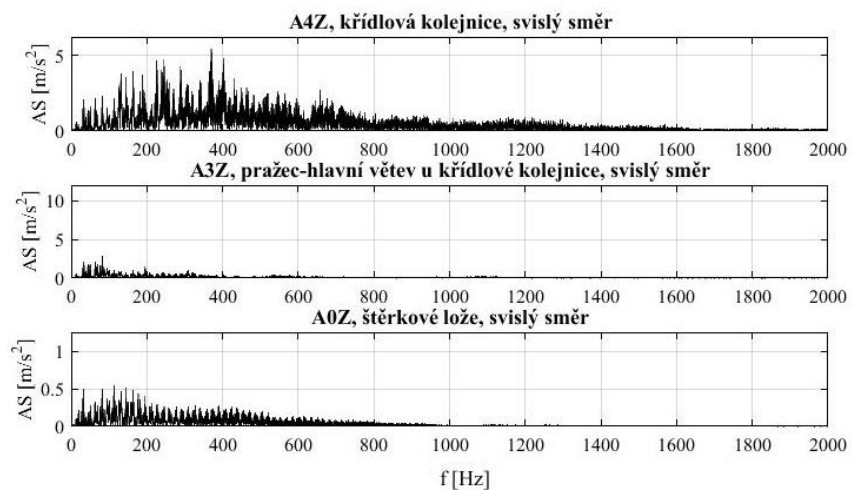
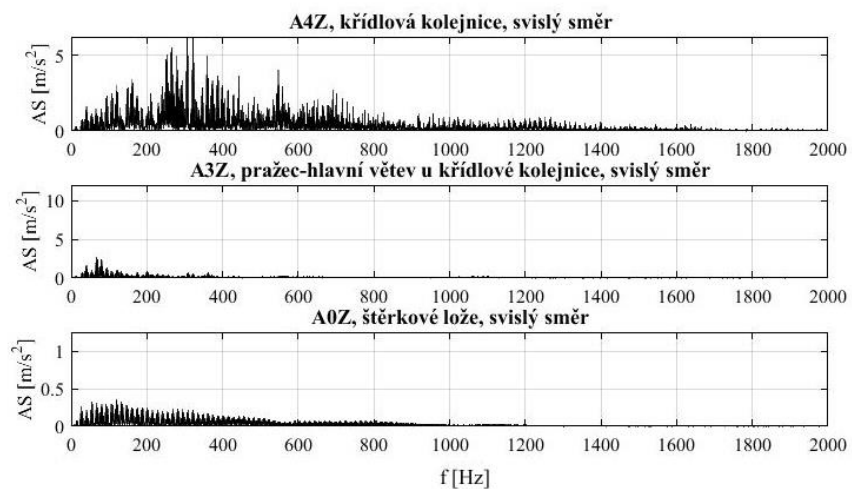
Srovnání ve frekvenční oblasti byla zaměřena na analýzu přehledových grafů, které jsou uspořádány vždy tak, že vlevo je časový průběh zrychlení kmitání a vpravo je z časového průběhu vypočítané frekvenční spektrum pomocí FFT. Grafy z frekvenčního spektra sestavení podle vlaku tak, že grafy z výhybky č. 3 jsou vlevo a č. 4 jsou vpravo (Obr. 6.3.2, Obr. 6.3.3, Obr. 6.3.4). Měřítko grafů pro stejné snímače je stejné pro lepší vizuální srovnatelnost. Z těchto přehledových grafů lze pozorovat klíčové frekvenční shluky uvedené v tabulce Tab. 6.3.1

Výh. č	Č. vlaku	Loko	Rychlost [km/h]	Hodnota frekvence odpovídající největšímu zrychlení [Hz]				
				A0Z	A3Z	A4Z	A5X	A6Y
3	29	Leo Express	130	150	50	300	1200	300
4	19	Leo Express	130	130	80	220	1600	100
3	13	Pendolino	156	100	80	400	1200	50
4	24	Pendolino	155	180	70	50	160	100
3	1	380	130	130	50	300	1200	80
4	23	380	125	50	60	220	1600	400
3	26	RegioJet	131	120	50	300	1200	300
4	22	RegioJet	130	100	60	200	400	90
3	7	RailJet	127	130	50	230	1200	300
4	17	RailJet	130	50	90	50	500	100

Tab. 6.3.1 Srovnání klíčových frekvencí u výhybky č. 3 a 4

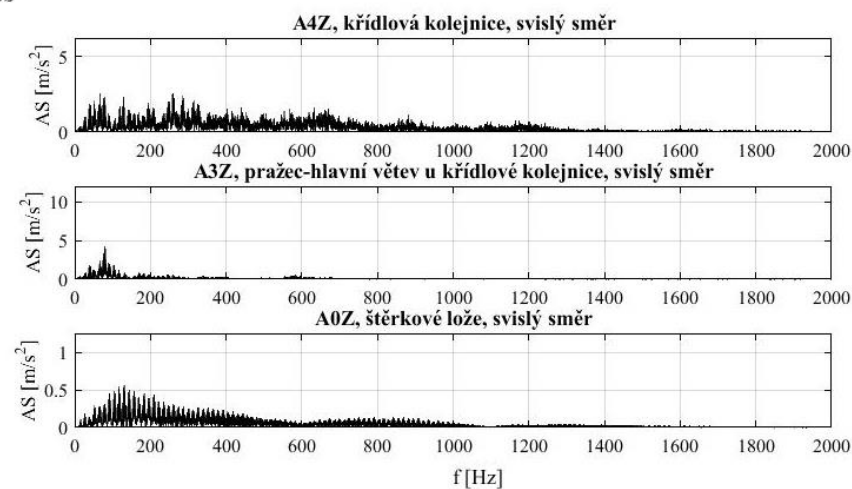
Z grafů a tabulky Tab. 6.3.1 je vidět, že na křídlové kolejnici ve svislém směru (A4Z) se pohybují klíčové frekvence u výhybky č. 3 ve vyšších hodnotách jako je tomu u výhybky č. 4. Tento jev lze často pozorovat i v podélném (A5X) a příčném (A6Y) směru, není vždycky to takhle objevují se, protože evidentně celkově výsledky hodně závislé na tom, jakým způsobem kolo do srdcovky najíždí. Na pražci (A3Z) už je situace opačná a vyšší frekvence můžeme sledovat u výhybky č. 4. Ve šterkovém loži (A0Z) pak sledujeme nižší hodnoty na výhybce č. 4 a vyšší hodnoty znovu na výhybce č. 3. I když tyto hodnoty taky umí poukázat na stav konstrukce, tak dějů, které mohou tyhle konkrétní píky ovlivnit, je více. Proto je důležitějším ukazatelem spíš to, kde se pohybují jednotlivé shluky klíčových frekvencí.

### Výhybla č. 3

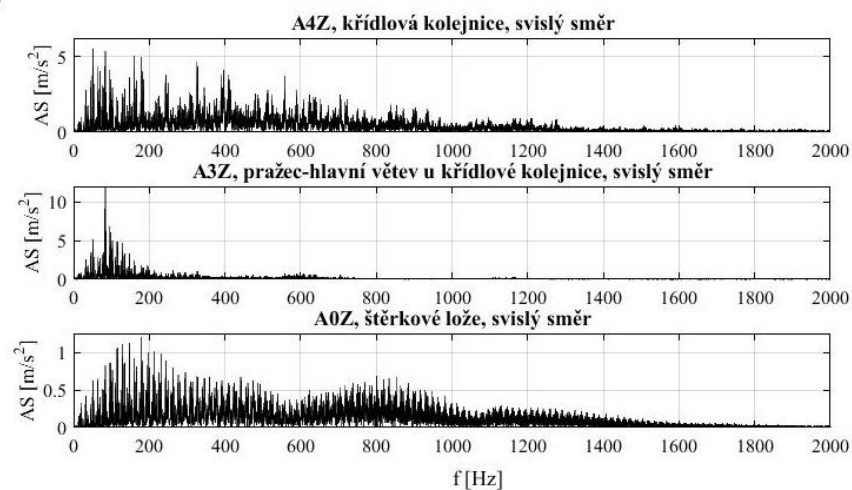


### Leo Express

### Výhybla č. 4

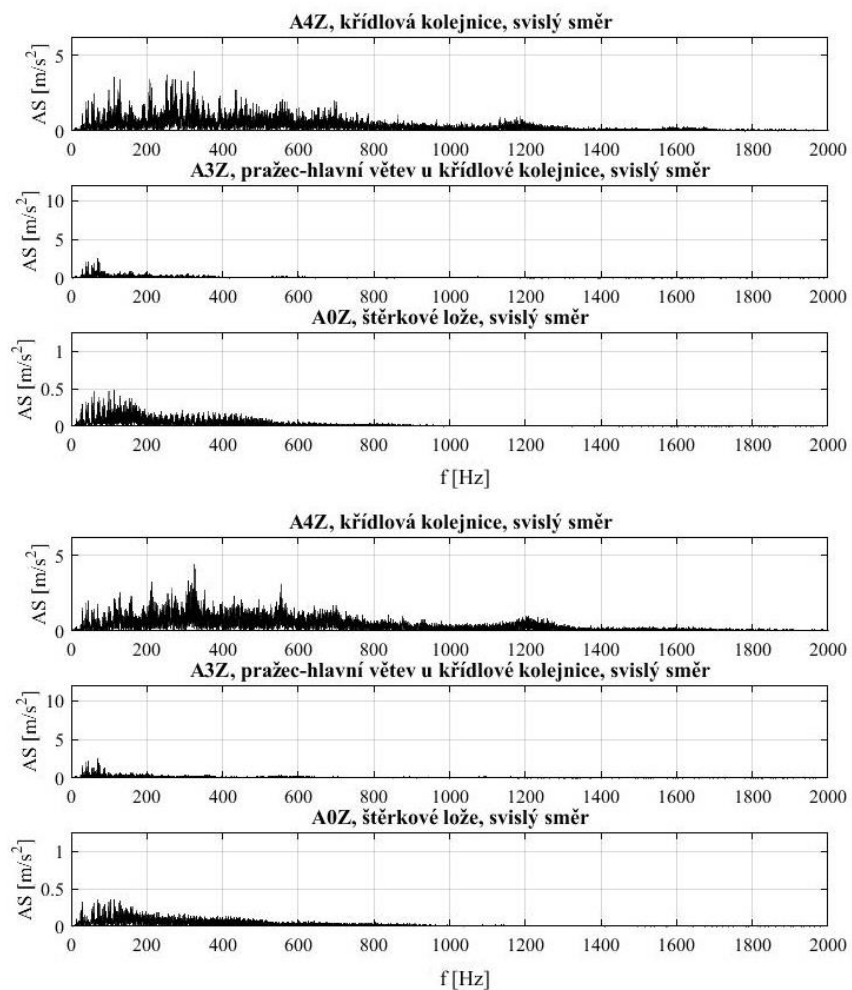


### Pendolino



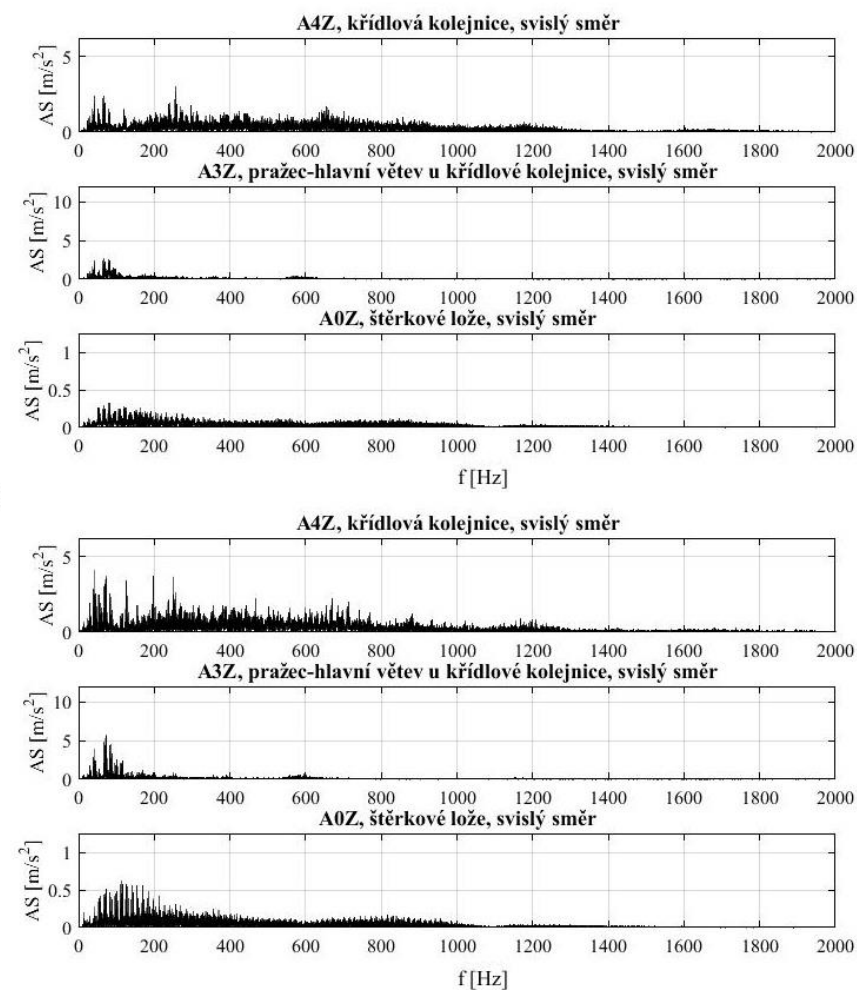
Obr. 6.3.2 Srovnání grafů zrychlení vibrací ve frekvenčním spektru, výhybky č. 3 a 4 při průjezdu vlakových souprav LEO Express a Pendolino

### Výhybla č. 3

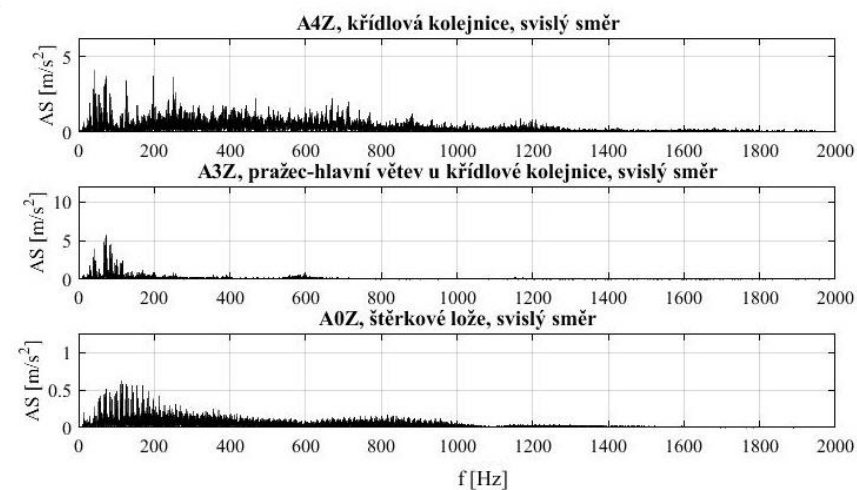


380

### Výhybla č. 4

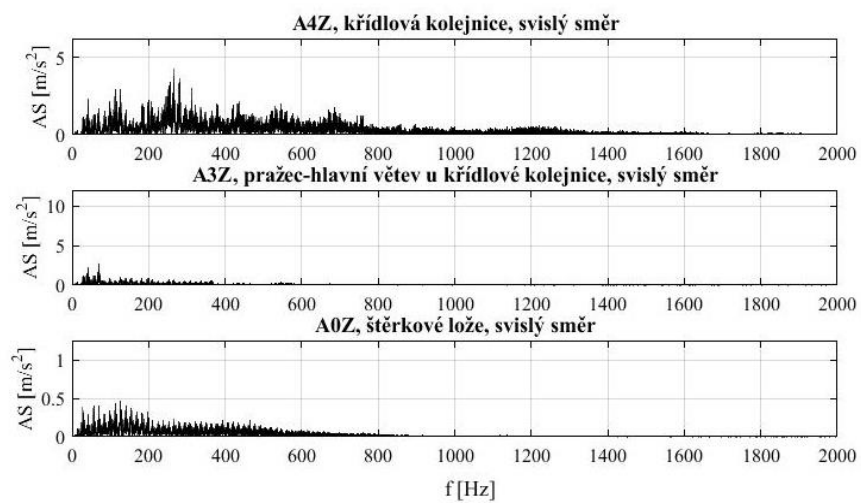


RegioJet



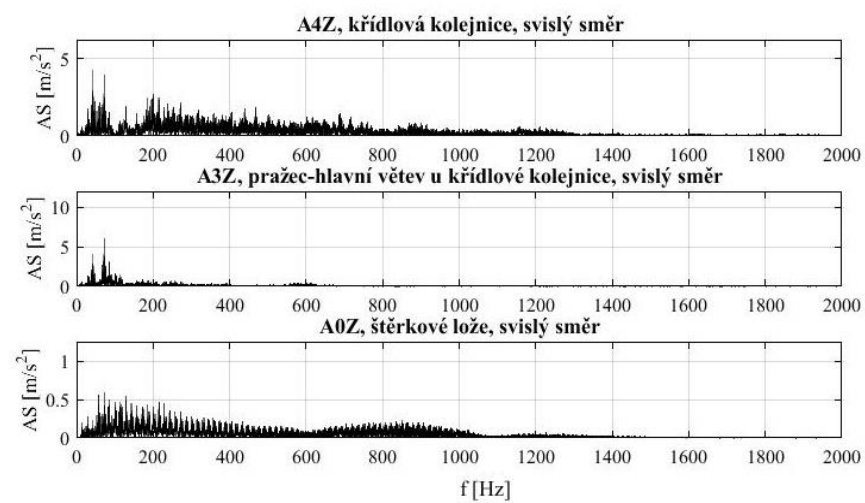
Obr. 6.3.3 Srovnání grafů zrychlení vibrací ve frekvenčním spektru, výhybky č. 3 a 4 při průjezdu vlakových souprav 380 a RegioJet

### Výhybla č. 3



RailJet

### Výhybla č. 4



Obr. 6.3.4 Srovnání grafů zrychlení vibrací ve frekvenčním spektru, výhybky č. 3 a 4 při průjezdů vlakových soupravy RailJet

Na výhybce č. 3 jsou na křídlové kolejnici v podélném směru (A5X) klíčové frekvenční složky v oblasti vyšších frekvencí kolem 1200 až 1400 Hz. Na výhybce č. 4 jsou také klíčové frekvenční složky na křídlové kolejnici v podélném směru (A5X) na vyšších frekvencích kolem 1400 a 1600 Hz, objevují se však i na nižších frekvencích okolo 200 Hz, 400 Hz a mezi 600 Hz až 800 Hz. V příčném směru na křídlové kolejnici (A6Y) jsou klíčové frekvenční složky mezi 80 Hz až 200 Hz, poté mezi 300 až 400 Hz a mezi 600 Hz až 800 Hz, a to pro obě výhybky č. 3 i č. 4. Na křídlové kolejnici ve svislém směru (A4Z) jsou na výhybce č. 3 klíčové frekvenční oblasti mezi 50 a 100 Hz, pak okolo 200 Hz a okolo 400 Hz a poslední klíčová oblast je mezi 600 Hz až 800 Hz. Na výhybce č. 4 jsou klíčové frekvence ve svislém směru na křídlové kolejnici (A4Z) především okolo 50 Hz, poté kolem 400 Hz, a dále 600 Hz až 800 Hz. Na pražci jsou u výhybky č. 3 i 4 klíčové frekvence mezi 50 Hz až 150 Hz. Ve šterkovém loži na měřicí tyči (A0Z) jsou klíčové frekvence u výhybky č. 3 mezi 40 Hz a 200 Hz, případně kolem 400 Hz, zatímco u výhybky č. 4 jsou to frekvence mezi 20 Hz a 300 Hz.

Z vyhodnocených posunu pražce u výhybky a šíření vibrací lze vyvodit následující skutečnosti. Na výhybce č. 4 můžeme pozorovat celkově vyšší hodnoty zatlačení pražce, nicméně z rozdílů mezi minimálními a maximálními hodnotami je patrné, že u výhybky č. 4 byl naměřen mnohem výraznější rozptyl hodnot. Z toho lze předpokládat, že kontakt mezi šterkem a pražci u výhybky č. 4 není optimální, a tedy při průjezdu vlaku je nejdříve pražec dotlačen na šterk a až následně zatlačován do šterku. Tento proces samozřejmě způsobí ve výsledku větší celkové zatlačení pražce v měřeném místě. Také bylo pozorováno, grafy pohybu pražce u srdcovky podle srovnávacích vlaků u obou konstrukcí skoro stejné, takže v tomto ohledu se obě konstrukce chovají podobně. Z pohybového chování tedy nelze jasně usoudit, jaký vliv má na hodnoty zpružněný uzel upevnění, protože se obě dvě konstrukce nenacházely v čase měření ve stejných podmínkách.

Z analýzy měření vibrací už můžeme snadněji hodnotit vliv zpružnění v uzlu upevnění. Na křídlové kolejnici byly u většiny vlaků naměřeny vyšší minimální a

maximální hodnoty zrychlení vibrací u výhybky č. 3, což je očekávaný jev, protože zmiňované zpružnění umožňuje kolejnici větší pohyb. Na pražci pod srdcovkou pak pozorujeme u výhybky č. 3 menší hodnoty zrychlení vibrací, a, co je nejdůležitější, rozdíly mezi hodnotami na kolejnici a na pražci jsou na výhybce č. 3 výrazně vyšší. To znamená, že při přechodu z kolejnice na pražec se u výhybky č. 3 mnohem větší část energie utlumila, co dokazuje pozitivní vliv uzlu upevnění UNO 3718. Ve frekvenční oblasti je možné vidět na křídlové kolejnici vyšší hodnoty klíčových frekvencí na výhybce č. 3, přičemž následně na pražci už je situace opačná a vyšší hodnoty klíčových frekvencí jsou pozorovány na výhybce č. 4. Frekvenční spektrum tedy také dokazuje pozitivní vliv zpružnění v uzlu upevnění. I z analýzy hodnot na všech ostatních snímačích lze konstatovat, že celkově uzel upevnění výhybky č. 3 lépe tlumí špičkové hodnoty zrychlení vibrací.

## **7. Celkové zhodnocení měření**

Na základě provedených měření a analýza lze konstatovat, že vytvořená zjednodušená metodika umožňuje dobře charakterizovat klíčové dynamické parametry svršku výhybek. Lze rovněž konstatovat, že použitá metodika poskytuje dobré výsledky a závěry. Měřené a vypočítané veličiny se vyznačují dostatečnou přesností a vypovídající schopností. Ke kvalitnímu zpracování naměřených dat velmi dobře přispěly použité prostředky časově a frekvenční signálové analýzy. Ze srovnání obou konstrukcí v oblasti srdcovek lze na základě hodnocení vybraných parametrů konstatovat následující.

Je očividně, že při stejné skladbě vlaků jsou hodnoty zatlačení naměřené na výhybce č. 4 obecně vyšší, a to v průměru o 1 mm. Dále je možno konstatovat, že rozdíly mezi nejvyššími a nejnižšími naměřenými hodnotami na jednotlivých snímačích jsou u výhybky č. 4 podstatně vyšší, než je tomu u výhybky č. 3.

Z analýzy šíření vibrací vyplývá, že na křídlové kolejnici ve svislém směru (A4Z) jsou u většiny vlaků vyšší hodnoty na výhybce č. 3. Na pražci u srdcovky

(A3Z) a ve štěrkovém loži (A0Z) jsou hodnoty naopak vyšší u výhybky č. 4, přičemž rozdíl často dosahuje i dvojnásobku. U většiny souprav se jeví, že na křídlové kolejnici ve svislém směru (A4Z) se pohybují klíčové frekvence u výhybky č. 3 ve vyšších hodnotách jako je tomu u výhybky č. 4.

Na pražci (A3Z) už je situace opačná a vyšší frekvence můžeme sledovat u výhybky č. 4. Ve štěrkovém loži (A0Z) pak sledujeme nižší hodnoty na výhybce č. 4 a vyšší hodnoty znovu na výhybce č. 3. Je vhodné podotknout, že na snímač A0Z se nachází na měřicím vlnovodu implementovaném do štěrkového lože v mezipražcovém prostoru, což není přímo pod pražcem hrotu srdcovky.

Po zhodnocení všech naměřených a vypočtených parametrů je možné konstatovat, že výhybka č. 3 je díky zpružněnému upevnění na tom z hlediska dynamického chování celkově lépe, jak v oblasti pohybového chování, tak z hlediska šíření dynamické energie konstrukcí a především výrazně ve špičkových zatíženích. Taky je možné přidat, že některé vlivy nebyly do analýzy zahrnuty. Záleží také na kvalitě pražcového podloží pod výhybkami, ojetí kolejnic, případně na dalších vlivech, které nelze odhadnout.

## **8. Závěry a doporučení**

Nové nebo inovované konstrukce železničního svršku se většinou testují různými metodami po dobu 5 let. Týká se to také výhybek a výhybkových konstrukcí. Závěrem na základě provedených prací doporučuji sledování výhybek pomocí zjednodušené metodiky zaměřené na měření a analýzu dynamických účinků alespoň čtyřikrát ročně, zároveň jednou ročně měřeními dle certifikované metodiky [7] z důvodu vyšší míry statistického hodnocení na šíření vibrací z křídlové kolejnice do štěrkové vrstvy v oblasti hrotu srdcovky. Po měření a hodnocení dynamických účinků zjednodušenou metodikou lze konstatovat, že metodika je průkazná a použitelná a že zkoumaný zpružněný uzel upevnění pozitivně ovlivňuje chování výhybky pod zatížením. Také se můžeme zamyslet



nad možností zahrnout do analýzy i měření vibrací ve štěrkové vrstvě formou měřících kamenů.

Dalším doporučením bude zamyslet se nad použitím zjednodušené metodiky ve výměnové části výhybky. Z důvodu menších nákladů na měření, můžeme tuto metodiku vícekrát opakovat a tím získat bohatší statistiku měření. Proto doporučuji využívat zjednodušenou metodiku častěji, než se tento typ měření nenahradí kontinuálně měřícím automatickým zařízením s dálkovým přenosem dat i ovládáním.

## Seznam použitých zkratk a symbolů

$a$	zrychlení
$a_{ef}$	efektivní hodnota zrychlení vibrací (častěji užívána jako RMS)
$a(t)$	okamžitá hodnota zrychlení vibrací
$A$	amplituda výchylky
$A0Z$	označení snímače zrychlení kmitání umístěného na měřicí tyči ve šterkovém loži
$A1Z$	označení snímače zrychlení kmitání umístěného za hlavou pražce v přímé větvi výhybky
$A2Z$	označení snímače zrychlení kmitání umístěného v ose přímé větve výhybky
$A3Z$	označení snímače zrychlení kmitání umístěného na pražci v blízkosti hrotu srdcovky
$A4Z$	označení svislé složky snímače zrychlení kmitání umístěného na patě křídlové kolejnice v přímé větvi výhybky
$A5X$	označení podélné složky snímače zrychlení kmitání umístěného na patě křídlové kolejnice v přímé větvi výhybky
$A6Y$	označení příčné složky snímače zrychlení kmitání umístěného na patě křídlové kolejnice v přímé větvi výhybky
$A7Z$	označení snímače zrychlení kmitání umístěného v ose odbočné větve výhybky
$A8Z$	označení snímače zrychlení kmitání umístěného za hlavou pražce v odbočné větvi výhybky
$A9Z$	označení snímače zrychlení kmitání umístěného na 2. pražci před hrotem srdcovky
DFT	diskrétní Fourierova transformace
$f(x)$	křivka klouzavého RMS
FFT	Fast Fourier Transform (rychlá Fourierova transformace)
FT	Fourier Transform (Fourierova transformace)
$g$	okénková funkce při výpočtu STFT
$j$	imaginární jednotka
$k_H$	Hertzova kontaktní tuhost
$\pi$	Ludolfovo číslo (3,14)
$P$	plocha pod křivkou klouzavého RMS
$P_0$	statická síla na kontaktu kolo-kolejnice
$Q$	kolová síla
RMS	RootMean Square (efektivní hodnota zrychlení vibrací)
$S0$	označení snímače posunu umístěného na 2. pražci před hrotem srdcovky
$S1$	označení snímače posunu umístěného na 1. pražci před hrotem srdcovky
$S2$	označení snímače posunu umístěného na hlavě pražce v přímé větvi
$S3$	označení snímače posunu umístěného na pražci pod místem přechodu z křídlové kolejnice na hrot srdcovky v ose přímé větve
$S4$	označení snímače posunu umístěného na pražci pod místem přechodu z křídlové kolejnice na hrot srdcovky
$S5$	označení snímače posunu umístěného na pražci pod místem přechodu z křídlové kolejnice na hrot srdcovky v ose odbočné větve
$S6$	označení snímače posunu umístěného na hlavě pražce v odbočné větvi
$S7$	označení snímače posunu umístěného na 1. pražci za místem přechodu z křídlové kolejnice na hrot srdcovky
STFT	ShortTime Fourier Transform (krátkodobá Fourierova transformace)

$(\omega) (t', f)$	..... časově-frekvenční reprezentace signálu
$T$	..... čas (doba, pro kterou se určuje efektivní hodnota)
$t$	..... čas
$t'$	..... časové posunutí okénka u STFT
$U$	..... norma vektoru okénkové funkce u Welchovi metody
USP	..... undersleeperpads (podpražcové podložky)
$\omega$	.....úhlová rychlost (úhlová frekvence)
$V$	..... rychlost jízdy vlaků v $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$
$v$	..... rychlost jízdy vlaku v $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
$X(f)$	..... reprezentace signálu ve frekvenční oblasti
$x(t)$	..... reprezentace signálu v časové oblasti
žst.	..... železniční stanice

## Literatura

- [1] TYC, KUBÁT, DOSTÁL, HAVÍŘ, *Železniční stavby - projektování železničních tratí, železniční spodek a svršek*. Vydavatelství Dh-PRESS Bratislava 1993, str. 253, ISBN 80-85545-05-5
- [2] PLÁŠEK, O.: *ŽELEZNIČNÍ STAVBY I*, "Výhybky a výhybkové konstrukce", Brno 2007
- [3] OTTO PLÁŠEK, PAVEL ZVĚŘINA, RICHARD SVOBODA, MILAN MOCKOVČIAK, *Železniční stavby. Železniční spodek a svršek*. Akademické nakladatelství Cerm, s.r.o, Brno 2004. 291s. ISBN: 80-214-2620-9
- [4] Otto Plášek, Pavel Zvěřina, Richard Svoboda, Vojtěch Langer, *ŽELEZNIČNÍ STAVBY II, Základní součásti železničního svršku*, Brno 2006
- [5] MILAN MORAVČÍK, MARTIN MORAVČÍK: *Mechanika železničních tratí 3 - Experimentálna analýza namáhania a pretvorenia komponentov tratě*, Žilinská universita 2002, ISBN 80-7100-985-7
- [6] Miroslava HRUZÍKOVÁ, Otto PLÁŠEK, „Použití podpražcových podložek v srdcovkách výhybek“, *STAVEBNÍ OBZOR* 3/2011
- [7] SMUTNÝ, J., L. PAZDERA a I. VUKUŠIČ. *Hodnocení dynamických účinků na výhybky. Certifikovaná metodika*, Ministerstvo dopravy – Odbor kosmických aktivit a ITS, 124/2014-710-VV/1, 2014
- [8] OTTO PLÁŠEK: *Kolejové konstrukce*, VUT FAST, Ústav železničních konstrukcí a staveb, přednáška
- [9] HAJNIŠ, Jan. *Analýza dynamických účinků působících na výhybkové konstrukce*, Bakalářská práce. Brno, 2011. VUT FAST
- [10] SADLEKOVÁ, Daniela. *Analýza dynamických účinků působících na výhybkové konstrukce*. VUT FAST. Brno, 2013, Bakalářská práce.
- [11] WIEST, M.; DAVES, W.; FISCHER, F. D.; OSSBERGER, H.: *Deformation and damage of a crossing nose due to wheel passages*
- [12] JANDOVÁ, K.: *Vibrodiagnostika. Prezentace*
- [13] Daniela Vukušičová „Analýza dynamických účinků působících na železniční Výhybky“, Brno, 2017. Diplomová práce.
- [14] Prof. Ing. JAROSLAV SMUTNÝ Ph.D., *Železniční konstrukce II (CN 04)*, Přednáška č.1, 2017
- [15] MÜLLER, R., B. NELAIN, J. NIELSEN, S. SAID, W. RÜCKER a E. BONGINI. *Description of the vibration generation mechanism of turnouts and the development of cost effective mitigation measures. Zpráva z projektu RIVAS, code: RIVAS\_UIC\_WP3-3\_D3\_6\_V02, version 2. 28. 2. 2013.*
- [16] JAROSLAV SMUTNÝ, LUBOŠ PAZDERA: *Železniční stavby – Měřicí technika a dynamika železničních staveb*, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., Brno 1998, ISBN 80-214-0976-296
- [17] Prof. Ing. JAROSLAV SMUTNÝ Ph.D., *Železniční konstrukce II (CN 04)*, Přednáška č.2, 2017

## Obrázky

- [22] ELUC, „Snímače polohy“  
<https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/960>
- [23] *Odporové tenzometry „Fóliový tenzometr“*  
<https://homel.vsb.cz/~jur286/mast/tenzometry.htm>
- [24] VOJÁČEK, Antonín. „Schéma principu piezoelektrických akcelerometrů“.  
*Automatizace.hw.2007*  
<http://automatizace.hw.cz/clanek/2007011401>

[25] „Dřevěné pražce, připravené k přibití kolejnic“

[https://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%BDelezni%C4%8Dn%C3%AD\\_pra%C5%BEec#/media/Soubor:CHZ\\_stavba\\_trati.jpg](https://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%BDelezni%C4%8Dn%C3%AD_pra%C5%BEec#/media/Soubor:CHZ_stavba_trati.jpg)

[26] Obrazek z katalogu firmy Getzner, „Podpražcové podložky pro štěrkové traťové lože“  
www.getzner.com

## **Seznam příloh**

- Příloha 1. Metodika měření 2
- Příloha 2. Příloha k měření v Ústí nad Orlicí - kampaň měření 3
- Příloha 3. Fotodokumentace z měření