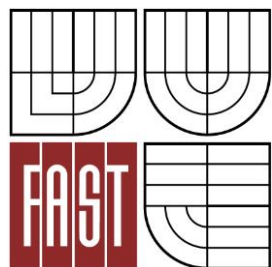




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV ŽELEZNIČNÍCH KONSTRUKCÍ A STAVEB

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF RAILWAY STRUCTURES AND CONSTRUCTIONS

ANALÝZA DYNAMICKÝCH ÚČINKŮ VE VÝHYBCE

ANALYSIS OF THE DYNAMIC EFFECTS IN THE TURNOUT

DISERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ING. IVAN VUKUŠIČ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. JAROSLAV SMUTNÝ, Ph.D.

BRNO 2015

Abstrakt

Kmitání železničního svršku je ovlivňováno zejména jeho kvalitou, provozně technickými podmínkami, klimatickými jevy, dynamickým zatěžováním od dvojkolí kolejových vozidel a rovněž kvalitou tělesa železničního spodku. Současně dynamické parametry závisí na rychlosti kolejových vozidel, dále na uspořádání náprav, jejich odpružení a odpružení vozové skříně, případně na hmotnosti na nápravu, a v neposlední řadě také na kvalitě jízdní plochy nákolku kola. Dynamické účinky od vlakových souprav se přenášejí přes kolejnici do podložek pod patu kolejnice, poté do podkladnic a upevnění, dále do šterkového lože a také do železničního spodku. Tato skutečnost platí zejména pro výhybky a výhybkové konstrukce. Ve výhybce se mění tuhost kolejové jízdní dráhy a rovněž je to místo, kde je přerušena pojížděná hrana kolejnice (u výhybek s pevným hrotem srdcovky). Především z těchto důvodů jsou výhybky místem zvýšených dynamických účinků a častých vad. Disertační práce bude věnována měření a analýze dynamických účinků ve výhybce. Cílem práce bude doplnění současného systému (sledování geometrických parametrů koleje ve výhybce a opotřebení výhybek) o sledování dynamických účinků. Bude navržena metodika měření, a vybrán vhodný matematický aparát k hodnocení dynamických účinků.

Klíčová slova

Výhybka, srdcovka, měření vibrací, dynamické účinky.

Abstract

The vibration of the railway superstructure is mainly influenced by its quality, by the operational technical conditions, climatic phenomena and above all by the dynamic load by the pair of wheels of the rail vehicles and also by the quality of railway subgrade. Simultaneously, the dynamic parameters also depend on the speed of rail vehicles, on the arrangement of axles, their spring mounting and on the spring mounting of the body casing or on the weight acting on the axle, and last but not least, also on the quality of the running surface of the wheel tyre. The dynamic effects of sets of wagons are transferred through the rails to the rail pads below the base of the rails, then to the sleepers or bearers and fastening system, then to the ballast bed and also to the superstructure construction. This fact applies especially for turnout structures. In turnout rigidity is changed and also there is a place where the wheel passes over a gap (in case of fixed crossings). In particular of above mentioned reasons, turnout is a place where high dynamic effects occur and that is why often defects occur. Dissertation thesis will be focused on measurement and analysis of the dynamic effects on turnout. The point of the thesis will be updating recent system (observing of the geometrical parameters and wear of the rails in turnouts) for dynamic effect observe. Methodology of the measurement and convenient mathematical apparatus for analysing dynamic effect will be proposed.

Keywords

Turnouts, crossings, vibration measurement, dynamic effects.

Bibliografická citace VŠKP

Ing. Ivan Vukušič *Analýza dynamických účinků ve výhybkách*. Brno, 2015. 157 s., 280 s. příl. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav železničních konstrukcí a staveb. Vedoucí práce prof. Ing. Jaroslav Smutný, Ph.D.

Prohlášení:

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

V Brně dne 31. 8. 2015

.....
podpis autora
Ing. Ivan Vukušič

Poděkování

Chtěl bych poděkovat především vedoucímu práce prof. Jaroslavu Smutnému, Ph.D., který se mi věnoval výrazně nad rámec svých povinností. Bez jeho podpory, odborných i praktických rad, bych neměl šanci tuto disertační práci sestavit. Jsem nesmírně rád, že jsem měl tu možnost se hodně naučit a doufám, že budu mít i v budoucnu příležitost s prof. Smutným spolupracovat.

Dále bych chtěl poděkovat všem, kteří se na organizaci a realizaci měření podíleli. Provedená experimentální měření nebylo lehké realizovat a bez podpory mých kolegů bych nebyl schopen měření zrealizovat vůbec. Chtěl bych poděkovat prof. Luboši Pazderovi, CSc., který se velmi výrazně podílel na všech měřeních. Dalšími pomocníky, bez nichž bych nedokázal měření realizovat, byli moji kolegové z Ústavu železničních konstrukcí a staveb Ing. Jan Valehrach, Ing. Petr Guziur, Ing. Jaroslav Bílek, Ing. Miroslava Hruzíková, Ph.D., Ing. Richard Svoboda, Ph.D., doc. Ing. Otto Plášek, Ph.D., Ing. Vladimír Tomandl, Zdeněk Meluzín, Karel Matoušek a Ing. Michal Volštát. Rád bych také poděkoval studentům a nyní již vlastně mým kolegům Bc. Daniele Sadlekové, Ing. Janu Hajnišovi, Ing. Anetě Francové a Ing. Adamu Podolníkově.

Měření proběhla za podpory projektu Zvýšení kvality jízdní dráhy ve výhybkách pomocí zpružnění, kód projektu TA01031297, podporovaný Technologickou agenturou České republiky. Za podporu z tohoto projektu bych také rád poděkoval.

Obsah

1.	Úvod	5
2.	Současný stav řešené problematiky	7
3.	Cíle práce	15
3.1.	Studium dynamických dějů ve výhybce.....	15
3.2.	Metodika měření dynamických účinků	16
3.3.	Matematický aparát.....	16
3.4.	Hodnocení efektivity údržbových prací	16
3.5.	Návrh zařízení na měření dynamických účinků.....	17
3.6.	Data pro optimalizaci výpočetních modelů.....	17
4.	Teoretický rozbor problematiky.....	18
5.	Snížení dynamických účinků v srdcovkách výhybek.....	22
5.1.	Optimalizace geometrie přechodu	22
5.2.	Materiál srdcovky výhybky a konstrukce srdcovky	24
5.3.	Systém upevnění srdcovky	25
5.4.	Podpražcové podložky (USP – under sleeper pads)	30
5.5.	Železniční spodek	30
6.	Metodika měření	31
6.1.	Metodika měření zrychlení vibrací	32
6.1.1.	Metodika měření zrychlení vibrací v srdcovkové části výhybky.....	32
6.1.2.	Metodika měření zrychlení vibrací ve výměnové části výhybky.....	33
6.1.3.	Metodika měření – výběr snímačů zrychlení vibrací.....	36
6.1.4.	Měření zrychlení vibrací ve šterkovém loži	37
6.2.	Pohybové chování konstrukce.....	41
6.2.1.	Metodika měření pohybového chování konstrukce v srdcovkové části výhybky	42
6.2.2.	Metodika měření pohybového chování konstrukce ve výměnové části výhybky	42
6.2.3.	Metodika měření – výběr snímačů pohybu	43
6.3.	Měření deformace (napětí) v konstrukci	44
6.3.1.	Měření deformace (napětí) na křídlové kolejnici	44

6.3.2.	Měření napětí v konstrukci pražcového podloží	45
6.4.	Doplnění měřicí sestavy o spouštěcí mechanismus.....	47
7.	Matematický aparát.....	49
7.1.	Časová oblast	49
7.1.1.	Efektivní hodnota zrychlení kmitání.....	51
7.2.	Frekvenční oblast.....	52
7.2.1.	Fourierova transformace	53
7.2.2.	Diskrétní Fourierova transformace – DFT	53
7.2.3.	Fast Fourier Transform – FFT.....	53
7.2.4.	Welchova metoda.....	53
7.2.5.	Parsevalův teorém	54
7.3.	Časově-frekvenční oblast	54
7.3.1.	Krátkodobá (okénková) Fourierova transformace (STFT).....	55
7.3.2.	Heisenbergův princip neurčitosti	56
8.	Parametry měření.....	58
8.1.	Vzorkování signálu – vzorkovací frekvence.....	58
8.2.	Kvantování signálu – A/D převodník.....	59
8.3.	Filtry	60
9.	Úvod k provedeným měřením.....	61
10.	Měření v žst. Poříčany.....	62
10.1.	Popis lokality měření a měřených výhybek	62
10.2.	Metodika a parametry měření.....	64
10.3.	Vyhodnocení měření v žst. Poříčany	66
10.4.	Vyhodnocení v časové oblasti.....	66
10.4.1.	Vyhodnocení v časové oblasti – pražec pod srdcovkou.....	66
10.4.2.	Vyhodnocení v časové oblasti – pražce po délce srdcovky	69
10.4.3.	Vyhodnocení v časové oblasti – přenos vibrací z křídlové kolejnice do šterkového lože	70
10.5.	Vyhodnocení ve frekvenční oblasti	72
10.5.1.	Vyhodnocení ve frekvenční oblasti – Welchova metoda.....	73
10.6.	Vyhodnocení v časově-frekvenční oblasti – STFT.....	76
10.7.	Celkové vyhodnocení měření v Poříčanech	78

11.	Měření v žst. Chocně.....	80
11.1.	Popis lokality měření a měřených výhybek	80
11.2.	Měření ojetí laserovým profiloměrem	82
11.3.	Přesná nivelace	83
11.4.	Metodika a parametry měření.....	85
11.5.	Vyhodnocení měření v žst. Chocně	86
11.6.	Vyhodnocení pohybového chování.....	86
11.7.	Vyhodnocení zrychlení vibrací	92
11.7.1.	Vyhodnocení v časové rovině.....	92
11.7.1.1.	Porovnání výhybek č. 59 a 63	92
11.7.1.2.	Porovnání měření na výhybce č. 59	96
11.7.2.	Vyhodnocení ve frekvenční rovině	100
11.7.2.1.	Vyhodnocení ve frekvenční oblasti – Welchova metoda	100
11.7.3.	Vyhodnocení v časově-frekvenční oblasti – STFT	109
11.8.	Celkové vyhodnocení měření v Chocni.....	112
12.	Měření v žst. Ústí nad Orlicí	114
12.1.	Popis lokality měření a měřených výhybek	114
12.2.	Metodika a parametry měření.....	116
12.3.	Vyhodnocení měření v žst. Ústí nad Orlicí	116
12.4.	Vyhodnocení pohybového chování.....	116
12.5.	Vyhodnocení zrychlení vibrací	118
12.5.1.	Vyhodnocení v časové rovině.....	119
12.5.2.	Vyhodnocení ve frekvenční rovině	123
12.5.2.1.	Vyhodnocení ve frekvenční oblasti – Welchova metoda	124
12.5.3.	Vyhodnocení v časově-frekvenční oblasti – STFT	129
12.6.	Celkové vyhodnocení měření v Ústí nad Orlicí	131
13.	Závěr	133
13.1.	Studium dynamických dějů ve výhybce.....	133
13.2.	Metodika měření	136
13.3.	Matematický aparát.....	138
13.4.	Hodnocení efektivity údržbových prací.....	139

13.5.	Návrh zařízení na měření dynamických účinků.....	139
13.6.	Data pro optimalizaci výpočetních modelů.....	140
14.	Doporučení.....	141
	Seznam použité literatury a dalších informačních zdrojů.....	143
	Seznam symbolů a zkratk	152
	Seznam příloh.....	156

1. Úvod

Železniční doprava od svého vzniku vždy vzbuzovala emoce, jedni jí byly fascinováni, jiným byla trnem v oku. Po celou dobu své existence byla a nejspíše i bude fenoménem, který jen málo lidí nechá chladnými. Stavba železniční dráhy vždy byla otázkou nejen velkých finančních nákladů, ale rovněž otázkou strategickou. Pomocí kvalitní železniční dopravy je možné přepravovat rychle velké množství materiálu i lidí, proto hrála klíčovou roli i v obou světových válkách. Od doby, kdy přijel na území České republiky první vlak, již uplynulo přes 176 let. Zlatý věk železnice byl tehdy na svém počátku. Budování železniční sítě v celé Evropě bylo v plném proudu. V té době znamenala železnice pokrok, prestiž a pro města a obce, do nichž zamířila, přísun investic.

Dnes je samozřejmě situace poněkud jiná a především automobilová doprava přebrala dopravě železniční velké množství přepravních objemů. Nicméně železnice nikdy neztratila svůj strategický význam. Zejména s ohledem na energetickou bezpečnost a šetrnost k životnímu prostředí je dnes ve spojené Evropě železnice vnímána jako páteří přepravní síť [1, 2]. Podepsáním protokolu přijatého v Kjótu dne 12. prosince 1997 se Evropská unie (EU) zavázala snížit své emise skleníkových plynů [3]. Tyto cíle vyžadují úpravu vyváženosti různých druhů dopravy, a v důsledku toho zvýšení konkurenceschopnosti železniční dopravy. Železnice je však velmi úzce navázána na průmysl jednotlivých zemí a existují velké rozdíly ve vnitrostátních předpisech [4]. Proto je v rámci Evropské unie velká snaha o sjednocení pravidel. V roce 1996 vyšla první směrnice o interoperabilitě a následovaly ji brzy další, aktuální je tato [4]. Na obecná pravidla směrnic poté navazují Technické specifikace interoperability (TSI), která již stanovují konkrétní technické požadavky. Tyto TSI jsou pro všechny země závazné a musí být dodržovány. Současně platné TSI pro kolejová vozidla jsou tato [5, 6, 7], pro tzv. pevné instalace (železniční svršek a spodek, umělé objekty, systém napájení – trolejové vedení, atd.) jsou platné tyto TSI [8, 9], v obecně platné skupině TSI jsou platné tyto [10, 11, 12] a ve skupině funkčních TSI jsou platné tyto [13, 14, 15]. Železniční síť se tak postupně stává více a více kompatibilnější, i když proces není snadný a nejde tak rychle, jak by si všichni představovali. Železnice tak opět zvyšuje svůj význam v rámci Evropy a všechny státy se snaží o co největší zapojení do mezinárodních koridorových tras.

V České republice se rozhodnutí o modernizaci koridorů stalo impulzem pro rozvoj všech odvětví železniční dopravy, a to jak v oblasti vozidel, tak v oblasti infrastruktury. Na tento pozitivní trend je však třeba navázat budováním vysokorychlostní sítě, která uvolní kapacitu na přetížených koridorech a umožní další rozvoj železničního průmyslu. Po modernizaci koridorů a zvýšení rychlosti na našich tratích se objevili nové okruhy problémů, se kterými jsme se do té doby nesetkávali. V souladu s tímto trendem musí postupovat i vývoj a aplikace nových experimentálních postupů pro hodnocení kvality

a účelnosti jednotlivých konstrukčních řešení. Zejména rychlost, kvalita a efektivita údržby je pro moderní železniční dopravu klíčovou záležitostí. Je však třeba vyvíjet takové prostředky diagnostiky, které nám umožní doplnit současný systém a budou pokrývat zejména tu oblast, kde doposud používané prostředky diagnostiky nestačí. Jedná se především o hodnocení dynamických účinků na konstrukci železniční dráhy.

Nejvíce namáhanými částmi železniční dopravní cesty jsou především místa přerušení plynulosti kolejové jízdní dráhy a místa změny tuhosti. Ve výhybkách se všechny tyto aspekty spojují, a to zejména u konstrukcí, které jsou pojížděny plnou traťovou rychlostí, což je u nás $160 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Studium působení dynamických účinků na konstrukci výhybky je proto velmi důležitou záležitostí, stejně jako hodnocení kvality a efektivitu údržby těchto konstrukcí a v neposlední řadě verifikace nových konstrukčních řešení v podmínkách plného provozu. Tato práce je zaměřena právě na tyto okruhy problémů.

Pro budoucí budování vysokorychlostní železniční sítě je třeba získat zkušenosti a znalosti, které budou založeny na sběru a vyhodnocení kvalitních dat. Toto know-how se nedá ničím nahradit ani koupit, jak se někteří mylně domnívají. Největším benefitem této práce jsou právě velmi složitě získaná data a jejich vyhodnocení.

2. Současný stav řešené problematiky

Klasická konstrukce kolejové jízdní dráhy se principiálně nezměnila již přes sto let. V posledních desetiletích se však výrazně zvýšila rychlost vlaků, výkon hnacích vozidel a tuhost kolejové jízdní dráhy. Z těchto důvodů se začaly objevovat nové okruhy problémů, k jejichž pochopení bude třeba zejména analýza dynamických účinků a studium jejich šíření [16, 17]. Výhybky a výhybkové konstrukce patří ke klíčovým komponentům tratě. Ačkoliv délka koleje s výhybkami představuje jen malou část železniční sítě (řádově procenta), údržba výhybek (včetně kolejových křižovatek a jiných speciálních kolejových konstrukcí) je velmi nákladná (řádově desítky procent z celkové ceny údržby) [18, 19, 20, 21]. Podle některých zdrojů tvoří údržba výhybek dokonce 20 – 40 % celkových nákladů na údržbu železniční sítě [18]. Je to dáno především složitým silovým působením, které vyvolává průjezd vlakové soupravy výhybkou a také nutností udržovat mnoho součástí, z nichž se výhybková konstrukce skládá. Kromě toho, že údržba výhybek s sebou přináší velké přímé náklady (náklady na údržbu), generuje velké náklady nepřímé (náklady na zpoždění vlaků, ať už při údržbě, nebo při pomalých jízdách, náklady na odklony, příp. náhradní dopravu, ...). Je tedy nezbytné údržbu těchto konstrukcí velmi pečlivě plánovat. Pokud nedojde včas k pravidelné údržbě, náklady na odstranění závady se velmi rychle zvyšují.

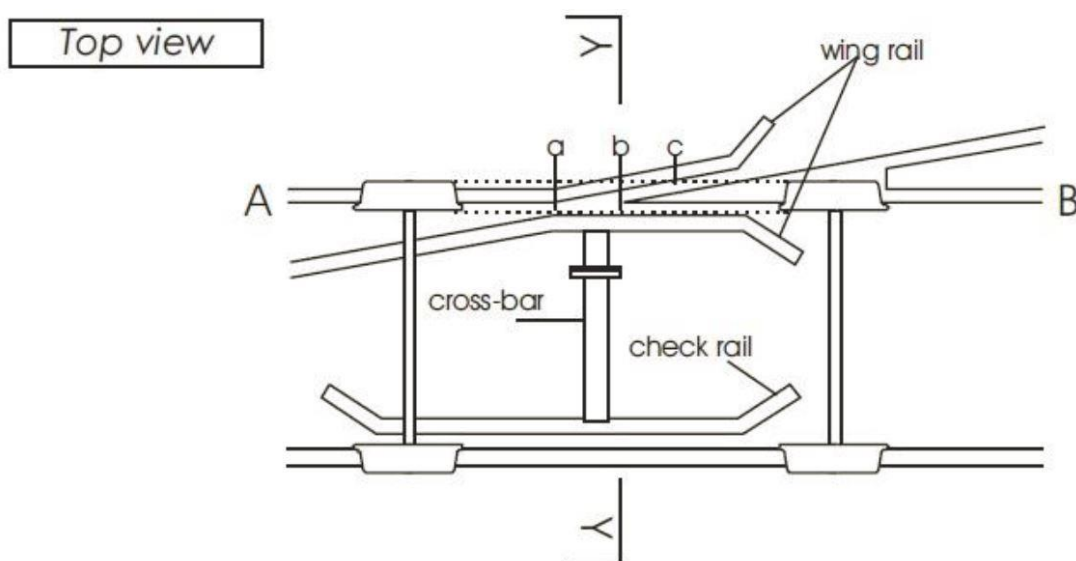
V České republice zatím neexistuje komplexní metodika měření a vyhodnocení dynamických účinků ve výhybkách. Tato problematika proto tvoří těžiště této disertační práce. Cíle budou zahrnovat studium výše popsané problematiky a metody měření a analýzy dynamických účinků. Ze získaných dat pak bude možné stanovit doporučení pro hodnocení a plánování údržby tak, aby byly minimalizovány dynamické účinky a ušetřily se tím i nemalé finanční prostředky.

Neustálé zvyšování nároků na únosnost vede k větší tuhosti konstrukčních vrstev a zemní pláň. Používají se rovněž již téměř výhradně betonové pražce, které mají mnohem větší ohybovou tuhost a menší pružnost než pražce dřevěné. Všechny tyto aspekty vedou k většímu namáhání kolejového lože, které pod zvyšujícím se zatížením mění svůj tvar a tím ovlivňuje geometrické parametry koleje. V běžné koleji z výše popsaných důvodů dochází ke zhroucení šterkové lavičky (šterková lavička = část šterkového lože pod pražcem, na které se roznáší zatížení z pražce, má lichoběžníkový tvar) za hlavami pražců a vlivem vysoké ohybové tuhosti betonových pražců se zde vytvoří volné prostory mezi pražcem a šterkem [22]. Při průjezdu vlaku pak pražce dosedají na šterkovou lavičku. Vzniká tak nerovnoměrné podepření pražců a zvyšují se dynamické účinky, což zrychluje degradaci kolejového lože. Ve výhybkách a výhybkových konstrukcích se k těmto problému ještě přidává změna tuhosti jízdní dráhy (ve výhybce jsou delší a tužší výhybkové pražce, je zde větší koncentrace

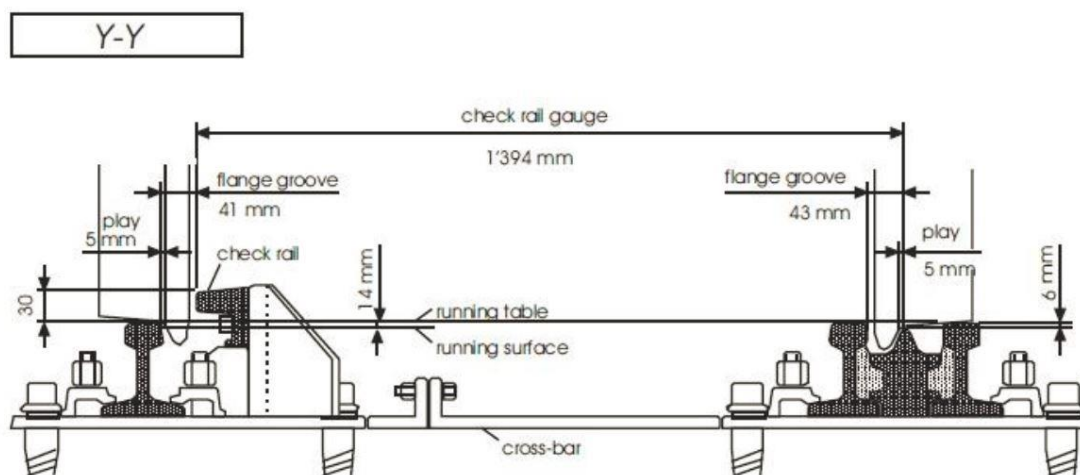
kolejnic) a působení dynamických rázů při přejezdu kola z křídlové kolejnice na hrot srdcovky, případně naopak.

Kombinace těchto faktorů způsobuje, že nejvíce namáhaným místem výhybkové konstrukce je srdcovková část výhybky. V tomto místě dochází, v závislosti na kvalitě geometrie přechodu, k dynamickému rázu. Tento ráz je přes pražce přenášen do kolejového lože, které je tak extrémně namáháno. Vlivem tohoto zatížení dochází k obrušování zrn kameniva štěrkového lože na styku s pražcem. Celý proces vyústí v degradaci tvaru kolejového lože pod pražcem, což má za následek nedostatečné podepření výhybkové konstrukce. Pokud není výhybková konstrukce dostatečně podepřena, zhroutlí se geometrie přechodu z křídlové kolejnice na hrot srdcovky a celý proces degradace se tím velmi urychlí.

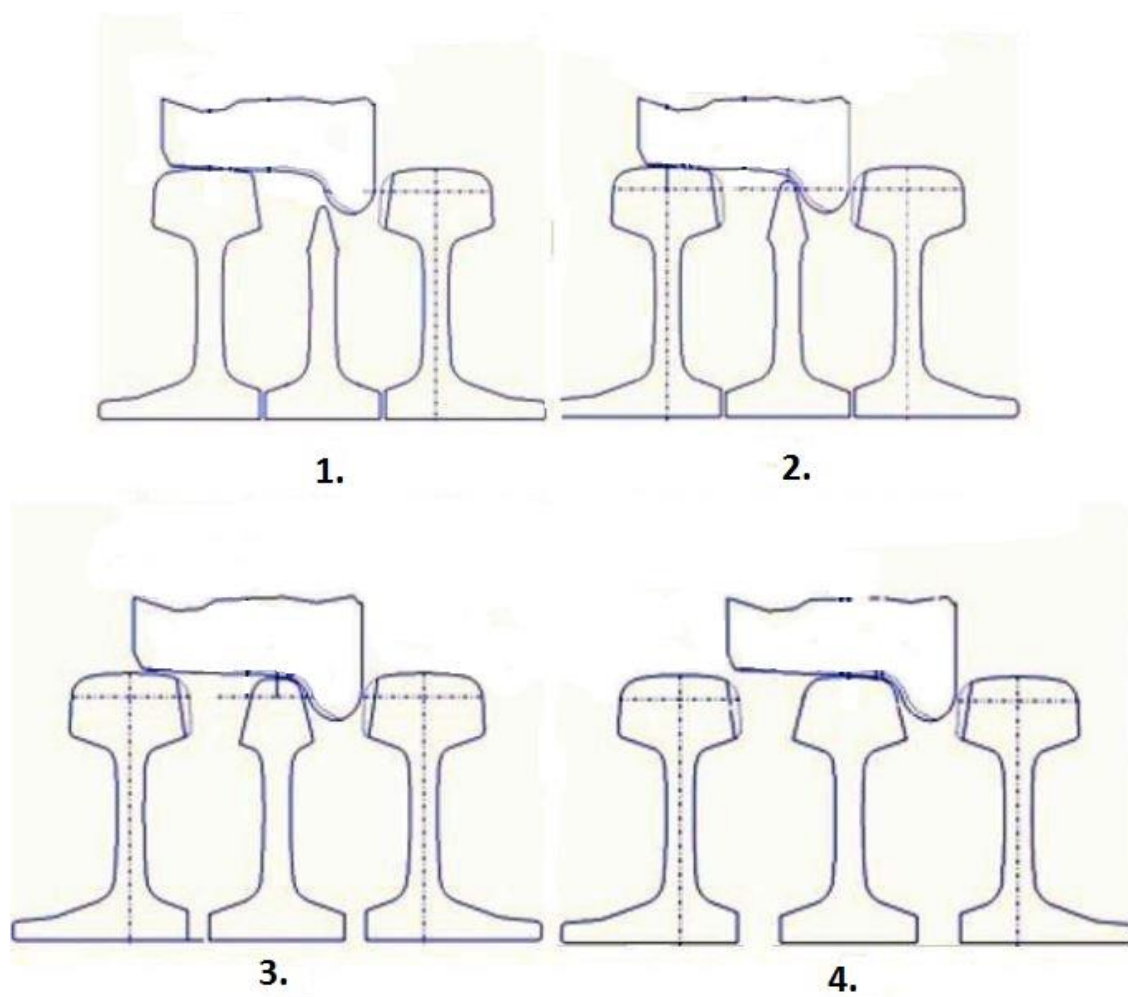
Mechanismus přejezdu kola z křídlové kolejnice na hrot srdcovky je velmi složitý prostorový problém, kterým se zabývají výzkumné týmy po celém světě, u nás se touto problematikou zabývá například [23], v zahraničí například [24, 25, 26]. Velmi zjednodušeně lze proces popsat následovně: Kolo najíždí na křídlovou kolejnici, která se odklání od osy koleje, aby vytvořila prostor pro srdcovkový klín. Vzhledem k příčnému průřezu kola tak kolo jede na křídlové kolejnici po menším poloměru a tak v podstatě klesá. V ideálním případě jsou tvary kol a geometrie přechodu ve výhybce provedeny tak, aby docházelo k minimálnímu poklesu kola a nárazu na srdcovkový klín. Nejlepším řešením se zdá být nadvýšení křídlové kolejnice [27]. Vzhledem k tomu, že kola i výhybky podléhají opotřebení, není tohoto ideálního stavu možné dosáhnout. Kolo tedy při nájezdu na křídlovou kolejnici začne klesat, a to až do okamžiku, kdy narazí na srdcovkový klín. Po nárazu na srdcovkový klín začne kolo opět stoupat. Velmi názorně je celý proces přejezdu kola vidět na Obr. 2.1 – 2.3 [28].



Obr. 2.1 Půdorysný pohled na přejezd dvojkolí přes srdcovku výhybky – schéma [28]

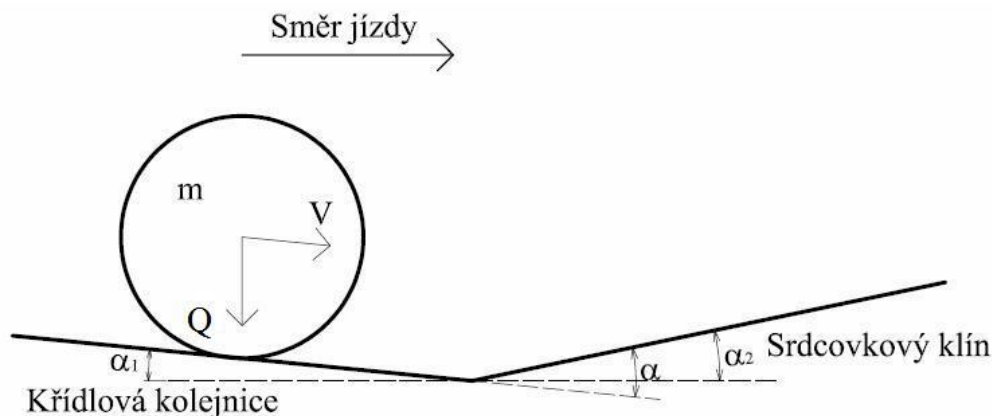


Obr. 2.2 Řez srdcovkou výhybky v místě, kde kolo přechází z křídlové kolejnice na hrot srdcovky [28]



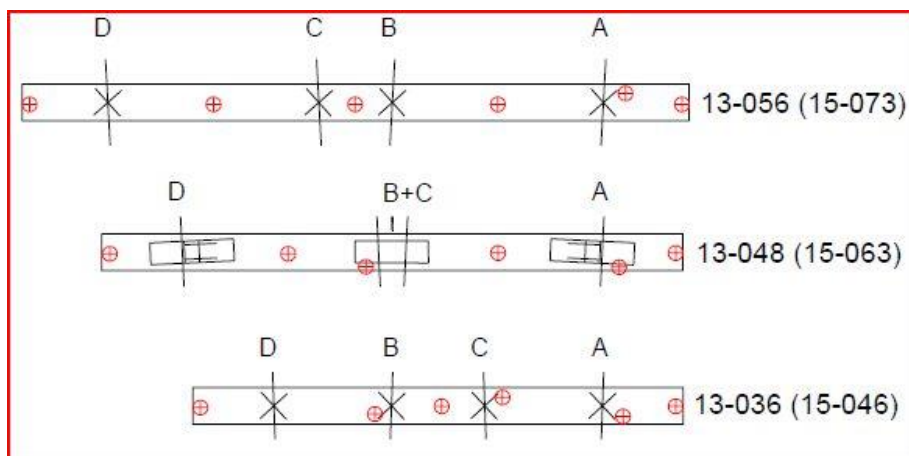
Obr. 2.3 Řezy srdcovkou – přechod kola z křídlové kolejnice na hrot srdcovky, od jednobodového kontaktu na křídlové kolejnici 1., po dvojbodový kontakt na křídlové kolejnici i hrotu srdcovky 2., 3., až po jednobodový kontakt na hrotu srdcovky 4. [28]

Pokud budeme uvažovat, že kolo klesá pod úhlem α_1 , poté narazí na srdcovkový klín a stoupá pod úhlem α_2 , bude zřejmé, že je srdcovkový klín zatížen navíc silami, které jsou závislé právě na velikosti úhlů α_1 , α_2 , hmotnosti na nápravu a samozřejmě na rychlosti přejezdu V . Zjednodušeně lze výše zmíněný děj popsat modelem na Obr. 2.4. Podotkněme, že úhel α_1 a α_2 jsou velmi malé úhly, na Obr. 2.4 jsou tyto úhly zvětšeny pro názornost.



Obr. 2.4 Přejezd kola přes srdcovku – zjednodušené schéma

Z provedených měření, která provedli pracovníci Ústavu železničních konstrukcí a staveb v letech 2004, 2005 [29], je zřejmý mechanismus porušení šterkového lože pod pražci. Cílem měření bylo zmapovat podepření pražců a jejich chování v provozu a také přenos vibrací od kolejnice do pražce. Měřeny byly zrychlení vibrací a poklesy pražců v oblasti srdcovky. Byl měřen pražec přímo pod srdcovkou výhybky a poté jeden pražec před a za srdcovkou (měřená místa na pražcích jsou označena křížkem v kroužku Obr. 2.5). Ze získaných průhybových křivek je zřejmé, že pod pražci se vytváří volné prostory v místech největšího namáhání kolejového lože, tzn. za hlavami pražců a především přímo pod srdcovkou, kde jsou poklesy největší. U výhybek, které jsou pojížděny převážně v jednom ze směrů, dochází vlivem jednostranného namáhání k nežádoucímu převýšení v oblasti dlouhých výhybkových pražců. Dynamické účinky rostou s rychlostí vlaků a způsobují ve výše zmíněných místech pod pražci vysoké namáhání kolejového lože. Toto vysoké namáhání způsobuje výškovou deformaci šterkové lavičky. Pod pražci tak zůstávají v klidovém stavu volné prostory v rozsahu 1 až 4 mm. Při průjezdu vlaku jedoucí náprava dotlačuje pražec na lavičku kolejového lože. Podle velikosti působící kolejové síly může, ale nemusí, být pražec dotlačen ložnou plochou na lavičku kolejového lože.

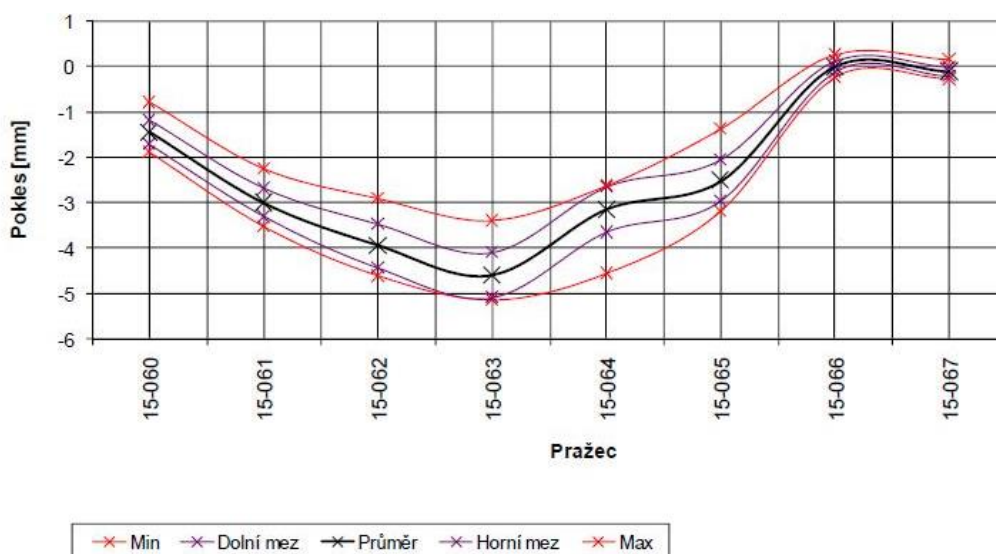


Obr. 2.5 Měřená místa na pražcích pod srdcovkou

Další měření bylo provedeno pracovníky Ústavu železničních konstrukcí a staveb v roce 2009 na výhybce č. 21 v žst. Moravany [30]. Předmětem měření bylo sledování svislých posunů a vibrací pod jednoduchou srdcovkou. Vibrace byly měřeny pod hrotem srdcovky, na křídlových kolejnicích a ve šterkovém loži. Cílem měření bylo zjištění svislých pohybů osmi po sobě jdoucích pražců pod srdcovkou. Bylo použito osm snímačů posunutí pro měření svislých pohybů na pražcích. Ty byly umístěny na pražcích 15-060 až 15-067 vlevo od srdcovky v přímém směru, viz Obr. 2.6. Výsledek tohoto měření v podstatě potvrdil hypotézu z předchozího měření. Nejlépe je chování pražců vidět na následujícím Obr. 2.7.



Obr. 2.6 Rozmístění snímačů při měření na výhybce v žst. Moravany

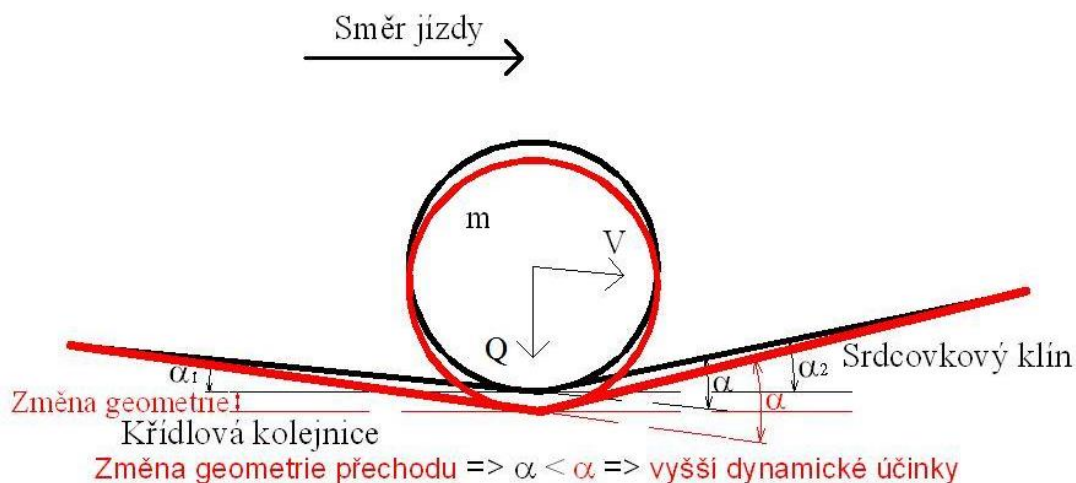


Obr. 2.7 Graf svislých pohybů pražců pod zatížením hnacími vozidly

Z předchozího grafu (Obr. 7) je patrné velké zhroucení šterkové lavičky pod pražci. Maximální zatlačení pražců vytváří téměř dokonalou průhybovou křivku. Tento průhyb změnil geometrii přechodu, čímž zvýšil dynamické účinky a navíc je srdcovka výhybky zatěžována ohybovým napětím, což vedlo až k prasknutí srdcovky. Směr jízdy vlaku byl od pražce 15-067 k pražci 15-060 (viz. Obr. 6). Největší pohyby vykazuje pražec přímo pod hrotem srdcovky. Dochází k velkým dynamickým rázům, což potvrdilo i měření vibrací. Dynamické rázy jsou extrémně vysoké především z důvodu špatného podepření výhybky, což v daném případě způsobilo zhroucení geometrie přechodu kola z křídlové kolejnice na hrot (Obr. 9). Toto zvýšené dynamické namáhání se rozneslo i na okolní pražce a ty také vykazují výrazné poklesy. Poklesy pražců jsou výraznější ve směru jízdy za srdcovkou, což je způsobeno roznosem dynamických sil působících na celý rošt v tomto místě při nárazu kola na křídlovou kolejnici. Povrchová deformace na hlavě kolejnice byla viditelná pouhým vizuálním posouzením (Obr. 2.8)



Obr. 2.8 Poškození křídlové kolejnice v místě nárazu kola



Obr. 2.9 Přejezd kola přes srdcovku při poklesu pražce pod srdcovkou

Geometrie přechodu je ovlivňována především následujícími parametry:

- Kvalitou materiálu výhybkové konstrukce (profil hlavy kolejnic a kvalita materiálu srdcovky a křídlových kolejnic)
- Kvalitou vozového parku (odpružení, hmotnost na nápravu, kvalita jízdní plochy nákolku kola)
- Kvalitou geometrie koleje ve výhybce a především před výhybkou (rozchod, zborcení, převýšení, úklon kolejnic)
- Kvalitou podepření a tuhostí koleje (podložka pod patou kolejnice, upevnění, pražce, podpražcové podložky, štěrkové lože, železniční spodek)

Aby byla geometrie přechodu pokud možno co nejdéle optimální, musí být optimální i vstupní parametry, které ji ovlivňují (viz výše uvedený seznam). Pokud se geometrie přechodu začne z jakéhokoli důvodu měnit, zvýší se dynamické účinky. Kvalita geometrie koleje ve výhybce je obecně řešena evropskými i vnitrostátními pravidly. V České republice je četnost kontrol a mezní odchylky GPK, stejně jako opotřebení součástí výhybky, stanovené několika předpisy [31],[32] a [33]. Rovněž v rámci interoperability je tato problematika řešena v rámci konečného TSI pro subsystém Infrastruktura [8]. Vzhledem k tomu, že se stále objevují nenadálé a nečekané selhání výhybek (například z důvodu prasknutí srdcovky), je systém pouhého sledování geometrických parametrů koleje ve výhybce nedostatečný. Kvalita geometrie koleje má jistě zásadní význam na velikosti dynamických sil působících na konstrukci výhybky. Také vybrané geometrické parametry, které se ve výhybce sledují, jsou stanoveny na základě desetiletí zkušeností, stejně jako četnost a způsob jejich kontroly. Železniční doprava však udělala v posledních letech výrazný technologický skok, proto bude vhodné současný systém doplnit. Systém sledování dynamických účinků na výhybce, který bude součástí disertační práce, přispěje k bezpečnosti provozu a optimalizaci údržbových prací.

Z hlediska výše popsané problematiky jsem se zabýval téměř výhradně srdcovkovou částí výhybky a především výhybkami s pevnou srdcovkou. Je třeba podotknout, že k zmíněným jevům dochází i na výhybkách s pohyblivým hrotem srdcovky a ve výměnové části výhybky při přechodu kola z opornice na jazykovou kolejnici. Ve výměně ani u výhybek s pohyblivým hrotem srdcovky však není přerušena pojížděná hrana kolejnice, proto zde nedochází k tak velkému dynamickému rázu, nicméně vlivem opotřebení, případně vlivem špatného podepření i zde dochází k výše popsaným jevům, i když s mnohem menší intenzitou. Celkově lze říci, že jakákoli náhlá změna tuhosti povede ke zvýšeným dynamickým účinkům, proto je dnes snaha o zpružnění celého systému tak, aby byla zároveň zachována jeho deformační odolnost. Netýká se to jen výhybek, ale například i přechodových oblastí mostů.

3. Cíle práce

Práce je zaměřena na experimentální měření přímo in-situ v podmínkách plného provozu a následnou analýzu změřených dat. Dnes je v odborné literatuře možné najít velké množství studií a prací, které se zabývají dynamickými účinky ve výhybkách. Je však velmi málo prací, kde jsou prezentovány i výsledky z měření provedených in-situ a reálná data jsou téměř nedostupná. Jsou prezentovány pouze částečné výsledky, z nichž je velmi složité udělat si nějaký komplexní obraz o reálných dějích přímo v provozu. Ve své práci se proto soustředím především na realizaci, provedení a vyhodnocení experimentálních měření přímo in-situ. Podílel jsem se na několika projektech, které se zabývaly studiem dynamických dějů ve výhybkách:

- Projekt Pražce s pružnou ložnou plochou, kód projektu TA01031173, podporovaný Technologickou agenturou České republiky;
- projekt Zvýšení kvality jízdní dráhy ve výhybkách pomocí zpružnění, kód projektu TA01031297, podporovaný Technologickou agenturou České republiky;
- projekt specifického vysokoškolského výzkumu na VUT v Brně s názvem Komplexní monitoring a analýza dynamicko-akustických jevů v koleji, kód projektu: FAST-J-11-21;
- projekt vnitřního grantového systému na FAST VUT v Brně pro rok 2009 s názvem Doplnění aparatury pro měření dynamických účinků na kolejových konstrukcích, kód projektu: VG329.

Experimentální přístup má samozřejmě své výhody i podstatné nevýhody. Nevýhodou je nalezení srovnatelné konstrukce, ke konstrukci, kterou chceme měřit a analyzovat. Je třeba zajistit stejné podmínky údržby, stejnou rychlost a skladbu vlaků, případně i konstrukci pražcového podloží a železničního spodku. Také je velmi složité zajistit měření jak po stránce lidských zdrojů, tak po stránce měřicí aparatury. V reálném provozu je velmi složité zajistit referenční soupravu, která by nám přes měřicí místo přejela několikrát a různou rychlostí. Výhody je možné spatřovat především v tom, že se jedná o zcela reálné podmínky jak uložení, tak i zatížení konstrukcí a z tohoto pohledu se jedná o data, která nelze jiným způsobem získat. Práce na experimentálních měřeních takového rozsahu v podmínkách plného provozu jsou v České republice unikátní. Níže uvedené cíle práce jsou tedy limitovány podmínkami, kterých bylo možné dosáhnout.

3.1. Studium dynamických dějů ve výhybce

Pro další optimalizaci prvků, ze kterých se výhybka skládá, je důležité vědět, jak velkým zatížením musí konstrukce odolávat v reálném provozu. Dále je důležité, jak se výhybka pod zatížením chová a jak velké zatlačení pražců je možné očekávat. Z výše

uvedených kapitol je zřejmé, že přenos dynamické energie celým systémem je klíčovou záležitostí, proto je důležité vědět, jakým způsobem se energie systémem šíří. Frekvenční rozdělení dynamického namáhání je pak nutné znát pro lepší optimalizaci prvků, zejména podložek pod patu kolejnice, upevnění, podpražcových podložek apod. Proto moje práce obsahuje i frekvenční analýzu. Redistribuce frekvencí v čase odpovídá na to, kdy které frekvence působí, především bude důležité se soustředit na okamžik přejezdu kola. Tuto oblast budu analyzovat pomocí časově-frekvenčních metod. Znalosti dynamického chování konstrukce v budoucnu jistě přispějí k zavedení efektivnějších konstrukčních opatření, zefektivnění údržby a v celkovém pohledu ke zvýšení bezpečnosti a minimalizaci nákladů.

3.2. Metodika měření dynamických účinků

Metodika měření dynamických účinků musí být stanovena na základě teoretického rozboru problematiky i na základě praktických zkušeností. Musí být sestavena tak, aby byla možná opakovatelnost měření a také aby bylo možné měření vůbec realizovat v podmínkách plného provozu. Metodika měření bude obsahovat výběr vhodných snímačů, jejich umístění na konstrukci a uchycení tak, aby bylo možné co nejlépe zachytit dynamické chování konstrukce výhybky. Do metodiky měření patří i výběr vhodné měřicí aparatury, která zajistí věrohodné zachycení měřených dat a bude schopna zpracovat velké množství simultánně měřených dat. V první fázi šlo o to, aby mi metodika měření co nejvíce pomohla při studiu dynamických dějů ve výhybce. Tuto komplexnější metodiku měření se pokusím prosadit i pro budoucí měření v praxi, aby bylo možné měření určitým způsobem standardizovat. Komplexní metodiku měření bude možné využít při měřeních nových typů konstrukcí. Na komplexní metodiku měření naváže metodika mnohem menší a úspornější, které bude možné využít například při hodnocení údržbových prací a vyhodnocení dlouhodobého chování konstrukce.

3.3. Matematický aparát

Vybrat vhodný matematický aparát pro zpracování dat. Lze očekávat, především při měření vibrací, silně stochastické děje. Je třeba zvážit, které hodnoty využít pro hodnocení a zda je třeba data filtrovat. Ze studia dynamických účinků ve výhybkách lze předpokládat, že kromě časové roviny bude zajímavý i převod do roviny frekvenční a časově-frekvenční. Pro tyto postupy je třeba vybrat vhodné matematické metody a jejich nastavení, abych ze získaných dat dostal co nejvíce informací.

3.4. Hodnocení efektivity údržbových prací

Stanovení pravidel, jak hodnotit efektivitu údržbových prací z pohledu dynamických účinků. Ve výhybkách je kvalita údržbových prací klíčovou záležitostí, a přesto se

nehodnotí vliv údržbových prací na dynamické účinky. Proto i tuto oblast jsem zahrnul do své práce.

3.5. Návrh zařízení na měření dynamických účinků

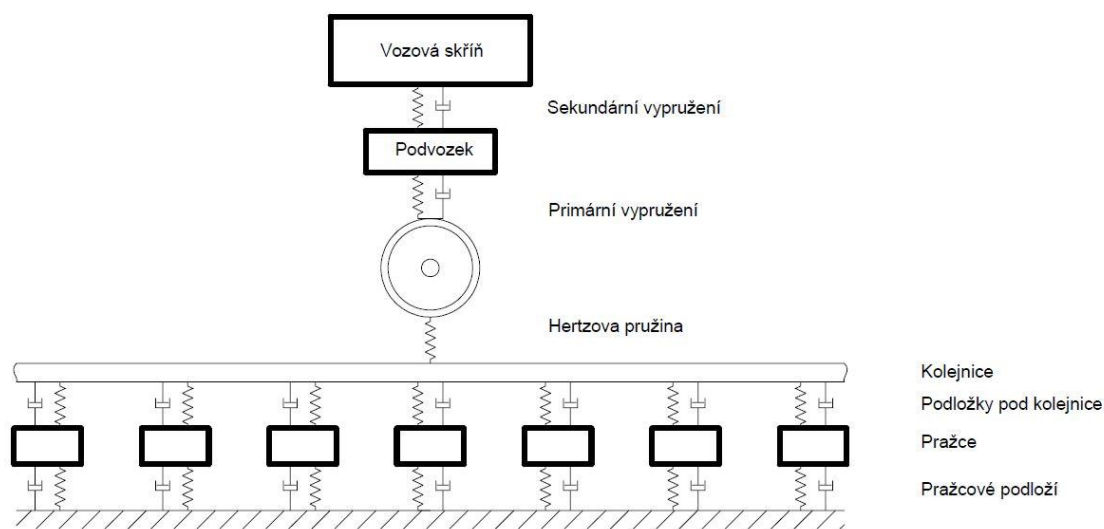
Návrh jednoduchého zařízení, které bude schopno měřit dynamické účinky přímo v plném provozu a bude ho možné využít při hodnocení kvality údržbových prací. Toto zařízení by mělo být přenosné, dostatečně přesné a relativně levné. Druhé zařízení bude možné využít na dlouhodobé sledování vývoje dynamických účinků v průběhu životního cyklu výhybky a bude proto stacionární – umístěné na konstrukci výhybky trvale.

3.6. Data pro optimalizaci výpočetních modelů

V neposlední řadě je cílem práce třídění a ukládání vhodných dat, která bude možné v budoucnu využít i pro optimalizaci výpočetních modelů (např. pro dynamickou analýzu výhybek).

4. Teoretický rozbor problematiky

Nalezení ideálního konstrukčního řešení a předcházení závadám spočívá ve správném pochopení dynamických účinků působících na výhybku. Výzkumné práce se dnes zabývají především modelováním běžné koleje i výhybek. Výpočtové modely jsou stále aktualizovány a na rozdíl od minulosti jsou již poměrně věrně schopny zachytit teoretické chování konstrukce [34, 35, 36, 37, 38]. I nejjednodušší modely jsou složeny jak z modelace vozu, tak i konstrukce koleje, ukázka takového jednoduchého modelu je na Obr. 4.1



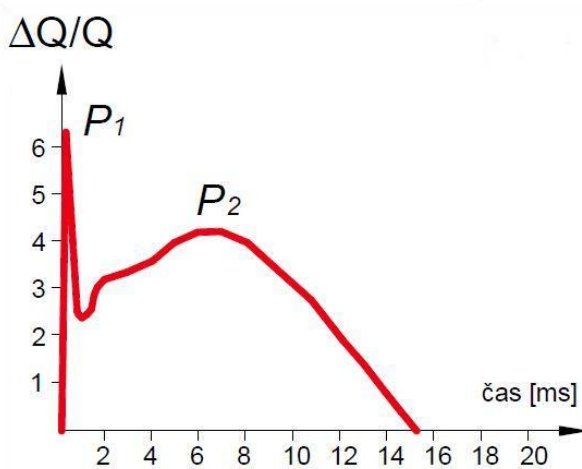
Obr. 4.1 Model dynamické soustavy vozidlo – kolej [17]

Výhybková konstrukce se skládá z několika prvků, které mají různou schopnost deformace. Kolejnice a pražce jsou charakterizovány ohybovou tuhostí. Konstrukce upevnění (podložky pod patu kolejnice a svěrky) je modelována pomocí pružin a tlumičů. Kolejové lože a podloží je obvykle modelováno podle Winklerovy hypotézy, ale také existují sofistikovanější prostorové modely metodou konečných prvků [39]. Je však snaha o věrnější modelování stěrkového lože a pražcového podloží, velmi nadějně vypadá metoda, kdy je stěrkové lože modelováno pomocí metod DEM (discrete element method). [40, 41, 42, 43, 44]. Některým autorům se podařilo pomocí metody DEM poměrně věrně zachytit tvar štěrkového zrna i jeho mechanické vlastnosti [46, 28, 38]. I nejjednodušší modely pak obsahují jak model koleje, tak i model kolejového vozidla.

Výhybky, a zvláště oblast srdcovky, jsou však z hlediska dynamického modelování velmi obtížným úkolem. Důvody jsou především dva. Ve výhybce dochází ke změně tuhosti oproti běžné koleji (je zde větší koncentrace kolejnic, delší a hmotnější pražce) a i v samotné výhybce se tuhost mění. Klasická výhybka je také místem, kde je přerušena pojížděná hrana kolejnice, a to na přechodu z křídlové kolejnice na hrot srdcovky. Toto přerušení má za následek, že zde dochází k dynamickému rázu. Analýza pružně-plastického prutu na podloží zatíženého dynamickým rázem je velmi složitá

úloha. Realistický model skutečného uspořádání zahrnující kolejnice, srdcovku, podložky pod kolejnicemi, a kolejové lože s podloží je mnohem složitější než modelování jednoduchého pružně plastického prutu na Winklerově podloží, což dokazuje například studie [45]. Existuje několik studií, které se zabývají modelováním dynamického rázu a zkoumají i vliv geometrie přechodu [24, 25, 26, 35, 28].

Odbornou veřejností je všeobecně přijímána následující hypotéza týkající se dynamického zatížení (dynamického rázu) na srdcovce výhybky. První odezva srdcovky na dynamický ráz, při přechodu z křídlové kolejnice na hrot srdcovky, se odehraje jako „vysokofrekvenční kontaktní proces“ („tvrdý ráz“), který je popsán silou P_1 . S ohledem na stav napjatosti, P_1 ovlivní hlavu srdcovky a způsobí typické rozložení kontaktního napětí. Po prvním kontaktu kola s hrotem srdcovky je změna hybnosti neodpružené hmotnosti přenesena na celý systém. Ten neobsahuje jen srdcovku, ale zahrnuje také sousední kolejnice, podložky pod kolejnicí, pražce a pražcové podloží. Takový ráz může být nazýván spíše jako „nízkofrekvenční ohybový proces“ („měkký ráz“), přičemž odpovídající síla je označena jako P_2 . S ohledem na stav napjatosti, P_2 ovlivňuje patu srdcovky a kolejnice, kde vzniká napětí od ohybu [46]. Při stanovení životnosti se zpravidla uvažuje právě toto napětí, viz [47]. Situace může být vyjádřena grafem na Obr. 4.2 [48].



Obr. 4.2 Rázové síly na srdcovce [48]

Síly P_1 a P_2 lze vypočítat dle následujících vzorců [18]:

$$P_1 = P_0 + \alpha v \sqrt{\frac{k_H m_{T1}}{1 + \frac{m_{T1}}{m_U}}}, \quad (4.1)$$

$$P_2 = P_0 + \alpha v \sqrt{\frac{m_U}{m_U + m_{T2}}} \left[1 - \frac{c_T \pi}{\sqrt{k_{T2} (m_U + m_{T2})}} \right] \sqrt{k_{T2} m_U}, \quad (4.2)$$

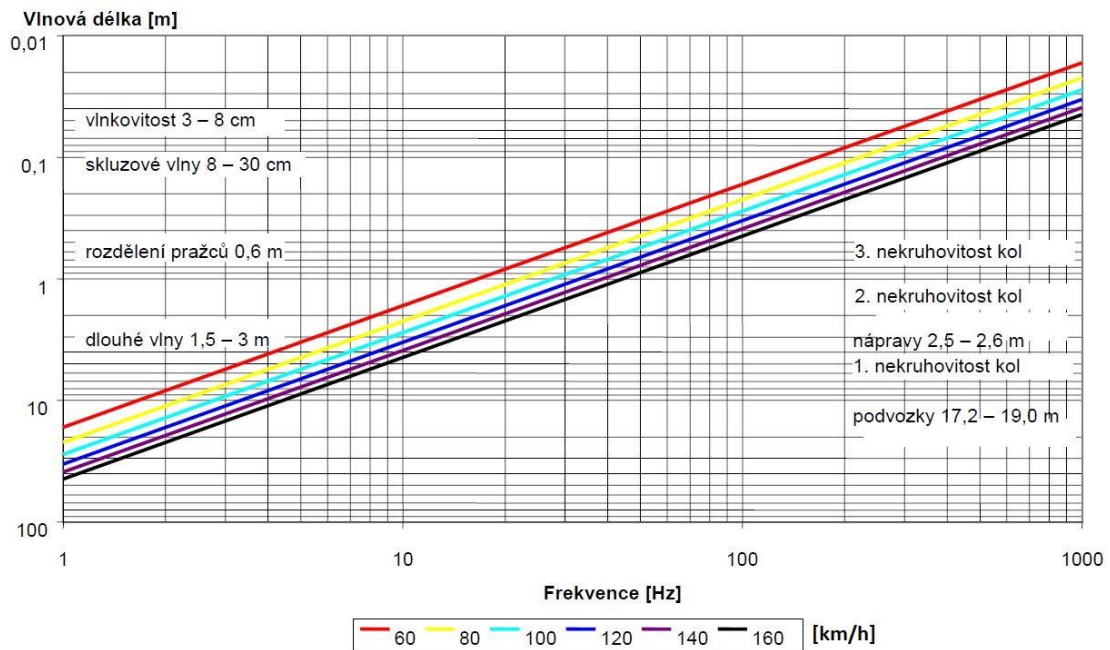
kde P_0 je statická síla na kontaktu kolo kolejnice (odpovídá kolové síle Q [kN]), α je celkový úhel pod kterým kolo narazí do srdcovky výhybky ($\alpha_1 + \alpha_2$) [rad], v je

rychlost vlaku $[m \cdot s^{-1}]$, k_H je Hertzova kontaktní tuhost $[N \cdot m^{-1}]$, m_{T1} je spolupůsobící hodnota hmotnosti koleje pro výpočet P_1 $[kg]$, m_U je neodpružená hmotnost $[kg]$, m_{T2} je spolupůsobící hodnota hmotnosti koleje pro výpočet P_2 $[kg]$, k_{T2} je ekvivalentní tuhost koleje pro výpočet P_2 $[N \cdot m^{-1}]$, c_T je ekvivalentní tlumení koleje pro výpočet P_2 $[N \cdot s \cdot m^{-1}]$.

Po nárazu kola se od povrchu srdcovky šíří vibrační energie směrem dolů k relativně tuhé podkladnici a pražci, na které je srdcovka uložena. Malá část energie je zachycena vnitřním tlumením samotné srdcovky, část energie je utlumena na podložce a pražci, ale také se část energie odrazí zpět, což je dobře vidět na poklesu a následném stoupání silových účinků mezi silovým vrcholem P_1 a P_2 na Obr. 4.2. Celková energie působící na srdcovku se dělí na deformační a kinetickou, přitom kinetická energie aktivuje určitou hmotnost srdcovky[46]. To se odráží i ve vzorcích pro výpočet sil P_1 a P_2 . U každého silového vrcholu působí jiná efektivní hodnota hmotnosti koleje. V případě síly P_1 se jedná zejména o hmotnost m_{T1} malé části srdcovky, což dokázali publikované analýzy metodou konečných prvků [20]. Tato hmotnost je vzhledem k relativně vysoké neodpružené hmotnosti kola m_U poměrně malá. Naopak, v případě hmotnosti m_{T2} pro výpočet silového vrcholu P_2 se již jedná o hmotnost nezanedbatelnou, neboť jak již bylo popsáno výše, se změna hybnosti přenesla na celý systém a spolu se srdcovkou již působí i okolní kolejnice, pražce a pražcové podložky. Silový vrchol P_1 se na konstrukci výhybky projeví především povrchovou deformací hrotu srdcovky, případně křídlové kolejnice (dle převládajícího směru jízdy). Silový vrchol P_2 pak zatěžuje srdcovku výhybky, okolní kolejnice a pražce ohybovým napětím.

Z publikovaných teoretických studií (např. [46, 28, 38, 24]) i výše uvedeného je patrné, že největší vliv na dynamický ráz má geometrie přechodu, především úhel α . To potvrdili jak teoretické studie spojené s modelováním pomocí metody konečných prvků [49, 50, 28, 38], tak i praktická měření přímo v trati [51, 52, 53, 54]. Pod úhlem α je však třeba si představit velmi složitý prostorový problém zjednodušený na rovinnou úlohu. Úhlem α je myšlen jízdní obrys kola, geometrie přechodu ve výhybce, poklesy pražců v oblasti srdcovky a také stabilita chodu vozidla (nebo jinými slovy jak moc rozkmitané vozidlo do výhybky přijede). Proto je vždy třeba se soustředit na celý komplex opatření, pokud chceme snížit dynamické účinky působící na výhybku.

Dynamické jevy se u soustavy vozidlo – kolej projevují v širokém rozsahu frekvencí: od 0,5–1 Hz pro příčná a svislá zrychlení skříní vozidel po 2 000 Hz buzené nepravidelnostmi na jízdních plochách kolejnic a kol. Primární vypružení mezi dvojkolím a podvozkem zachycuje a tlumí vibrace vzniklé na kontaktu kolo – kolejnice. Sekundární vypružení zachycuje a tlumí nižší frekvence. V konstrukci tratě primární vypružení představuje konstrukce upevnění kolejnice – pružné podložky a svěrky, sekundární vypružení je vytvořeno pomocí kolejového lože [22]. Z hlediska vlnových délek a frekvencí je obecně přijímána hypotéza dle [78] viz Obr. 4.3.



Obr. 4.3 Zdroje vibrací z hlediska vlnové délky [22]

Pokud se na dynamický ráz ve výhybce podíváme z hlediska frekvenčního složení, pak se v odborné literatuře objevuje, že síla P_1 se projevuje v oblasti frekvencí okolo 200 Hz a síla P_2 v oblasti frekvencí 50 Hz až 80 Hz [54]. Ve výhybkách však tato teorie zcela platit nebude, neboť je třeba mít na paměti, že geometrie přechodu, změny tuhosti a další parametry způsobí, že dominantní frekvence mohou být úplně jiné. Všeobecně se předpokládá, že s vyšší tuhostí celé konstrukce se budou i frekvenční složky sil P_1 a P_2 posouvat k vyšším frekvencím [54].

5. Snížení dynamických účinků v srdcovkách výhybek

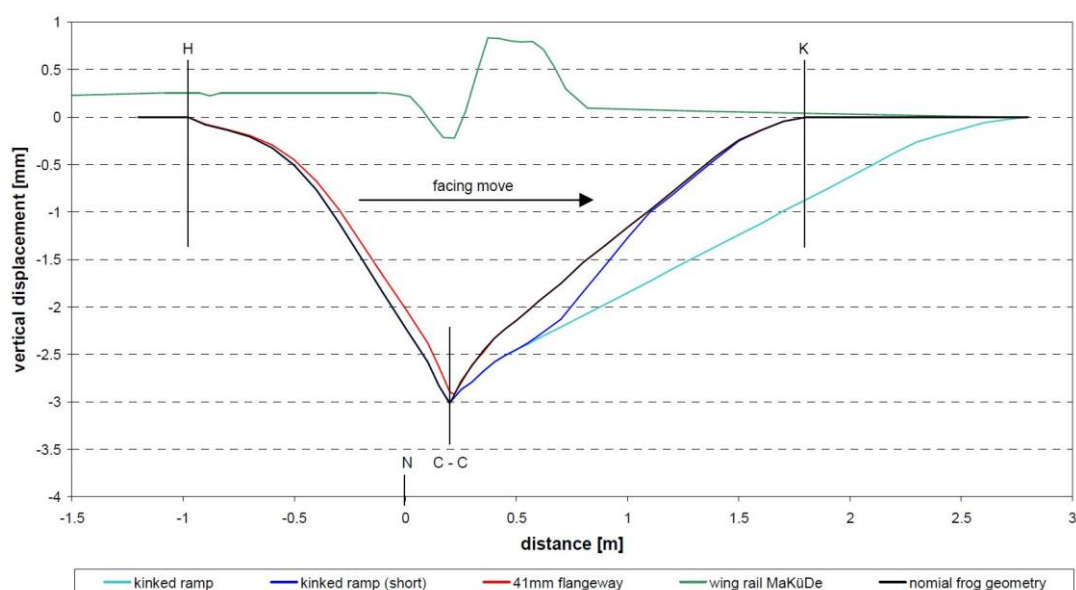
Existuje spousta opatření, která se dnes aplikují na výhybky, aby bylo dosaženo co nejdelší životnosti. Vždy je však třeba si uvědomit, že je nutné celý systém a opatření vyvážit tak, abychom dosáhli co nejlepšího řešení, zejména ideální tuhosti. Pokud bude tuhost příliš vysoká, bude nám docházet k většímu ojetí materiálu a také bude vlivem většího kontaktního napětí docházet k větším plastickým deformacím materiálu výhybky [55]. Vysoká tuhost také způsobí velké namáhání šterkového lože [22]. Nízká tuhost naopak může výhybku namáhat ohybovým momentem a může vést k velkým rázům na hrot srdcovky, případně křídlovou kolejnici [30]. Z předešlých kapitol je zřejmé, že klíčovou záležitostí pro co nejdelší životnost výhybky (v oblasti srdcovky a v podstatě i výměny) je udržení co nejlepší geometrie přechodu kola z křídlové kolejnice na srdcovku a naopak (případně přechod z opornice na jazykovou kolejnici v oblasti výměny). Níže jsou prezentovány některá opatření, která se aplikují na výhybky, aby bylo dosaženo snížení dynamických účinků.

5.1. Optimalizace geometrie přechodu

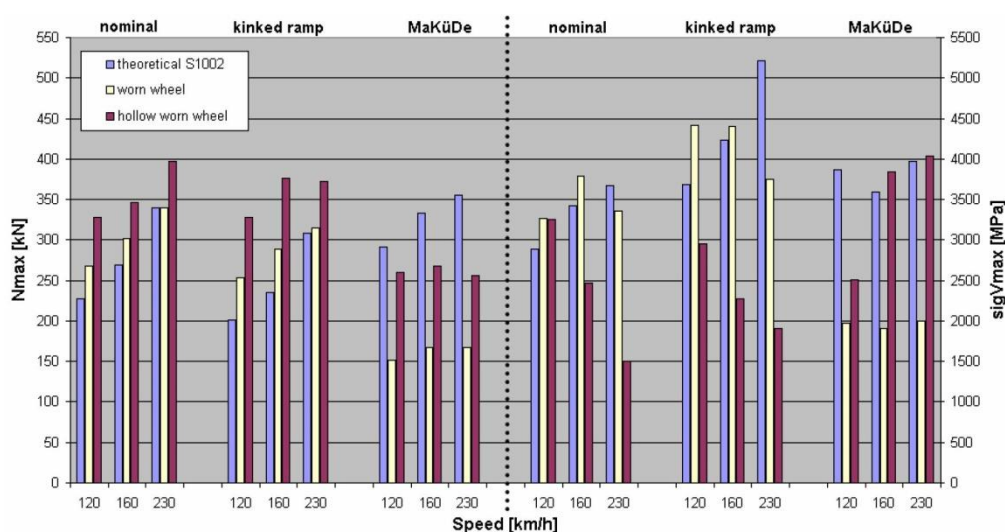
Velmi obtížnou záležitostí se zdá optimální navržení geometrie přechodu kola z křídlové kolejnice na hrot srdcovky. Je třeba podotknout, že ideální geometrii přechodu je možné navrhnout jen teoreticky, protože kola i srdcovka podléhají opotřebení. Jedná se tak vždy o určitý kompromis, který je třeba navrhnout tak, aby vyhovoval co největšímu počtu kol v provozu. Je důležité zdůraznit, že tvar kola má zcela zásadní význam na dynamické účinky a ovlivňuje tak i životnost výhybky. V rámci projektu Innotrack [60] byly modelovány různé optimalizace geometrie přechodu. První úpravou bylo „zploštění“ hrotu srdcovky (na Obr. 5.1 označeno jako „kinked ramp“ - jsou tam hned dvě varianty této úpravy), tedy snaha o zmenšení úhlu α_2 z Obr. 2.4. Další úpravou bylo snížení hodnoty šířky žlábků mezi klínem srdcovky a křídlovou kolejnicí na 41 mm, zde byla snaha omezit pohyb kola v příčném směru a tím zajistit lepší přechod z křídlové kolejnice na hrot srdcovky (toto řešení se ukázalo jako nevhodné). Třetí úpravou bylo nadvýšení křídlové kolejnice dle tvaru MäKuDe (vyvinutý firmou DB Systemtechnik) tak, aby docházelo k minimálnímu nárazu na srdcovkový klín. Všechny úpravy jsou zjednodušeně zobrazeny na Obr. 5.1. Šipkou je na Obr. 5.1 označen pohyb kola proti hrotu srdcovky, písmenem H je označen začátek křídlové kolejnice, písmenem K je označen konec hrotu srdcovky, písmenem N je označen začátek hrotu srdcovky a C-C je označeno místo teoretického přechodu kola z křídlové kolejnice na hrot srdcovky. Pro simulaci přejezdu byla vybrána lokomotiva BR101 s kolovou silou 107 kN a tuhost koleje byla uvažována 500 kN/mm. Výsledek simulace je na Obr. 5.2, vlevo je normálová kontaktní síla a vpravo ekvivalentní napětí. Simulace byly provedeny pro tři tvary kola, nové tvaru S1002, ojeté (worn wheel) a ojeté s prohlubní v jízdní ploše (hollow worn wheel). Z Obr. 5.2 je vidět, že pro tvar jízdního obrysu kola S1002 dosahuje nejlepších výsledků (z pohledu normálové síly)

zploštění hrotu. Čím horší je však ojetí jízdní plochy kola, tím lepších výsledků dosahuje úprava MaKuDe, a to jak z pohledu normálové síly, tak z pohledu ekvivalentního napětí. Vzhledem k podmínkám, které jsou na tratích v České republice a stavu vozového parku, se zdá být nadvýšení křídlové kolejnice ideálním řešením a také se k tomu opatření přistupuje.

Důležitou záležitostí, zvláště při vyšších rychlostech je rovněž úklon hlavy kolejnice [63], aby byla zachována příznivá hodnota ekvivalentní konicity a nedocházelo při průjezdu výhybkou k příčnému rozkmitání vozů a tím i k většímu rázu na srdcovku výhybky. Proto se u výhybek opracovává hlava kolejnice tak, aby odpovídala uložení kolejnice 1:40, jedná se i o požadavek TSI Infrastruktura [8].



Obr. 5.1 Vliv návrhu geometrie srdcovky na svislý pohyb kola při průjezdu z křídlové kolejnice na hrot srdcovky [60]

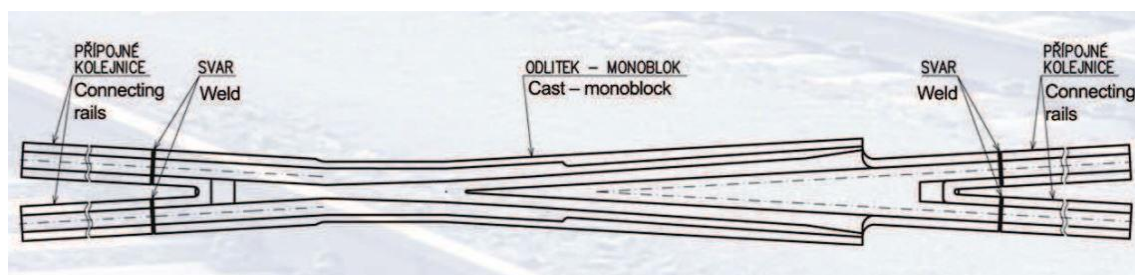


Obr. 5.2 Vliv geometrie přechodu a profilu kola na maximální normálovou kontaktní sílu a na ekvivalentní napětí [60]

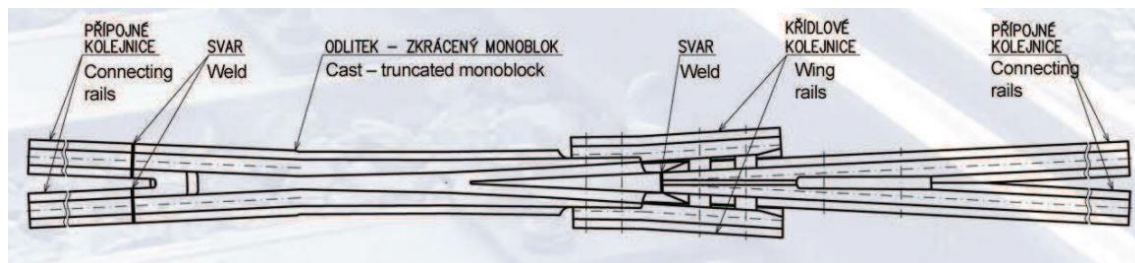
5.2. Materiál srdcovky výhybky a konstrukce srdcovky

V oblasti materiálů pro samotnou srdcovku výhybky je třeba mít na zřeteli, že se jedná o místo, které je namáháno velkým kontaktním napětím, které způsobuje deformace povrchových vrstev pojížděného materiálu a také opotřebení kontaktní únavou. To vše může vést až k celistvým lomům srdcovky. Dnes se obecně používají spíše manganové a bainitické oceli. Manganová a bainitická ocel mají vysokou úroveň odolnosti proti opotřebení, tvrdosti, meze kluzu a meze pevnosti. Představují velmi výhodnou kombinaci materiálových a technologických parametrů [56]. V poslední době se začíná užívat oceli bainitické. Ta splňuje požadavky svařitelnosti a obrobitelnosti srdcovek, což ji přímo předurčuje jako atraktivní náhradu oceli hadfieldského typu pro srdcovky železničních výhybek. U nás se používá litá nízkouhlíková legovaná bainitická ocel pod označením Lo8CrNiMo [57] a nově její modifikovaná varianta Lo17MnCrNiMo[58]. U takové oceli je velmi důležité udržet kvalitu odlitku, aby později nedocházelo k mikrotrhlinám [57]. Bainitická ocel se rovněž jeví i jako ekonomicky výhodnější [59]. Z hlediska materiálových vlastností se zdá, že jde vývoj i u nás správným směrem, což dokládají například i výsledky projektu Innotrack [60].

Kromě materiálu je velmi důležitá i samotná konstrukce srdcovky výhybky. Ta musí odolávat velkému dynamickému namáhání od železničních kol. Z tohoto důvodu se pro srdcovky v hlavních tratích používají prakticky výhradně jednoduché odlitky, u nás většinou ve formě monoblok (Obr. 5.3) a zkrácený monoblok (Obr. 5.4) [61].



Obr. 5.3 Náčrt jednoduché srdcovky výhybky typu monoblok [62]



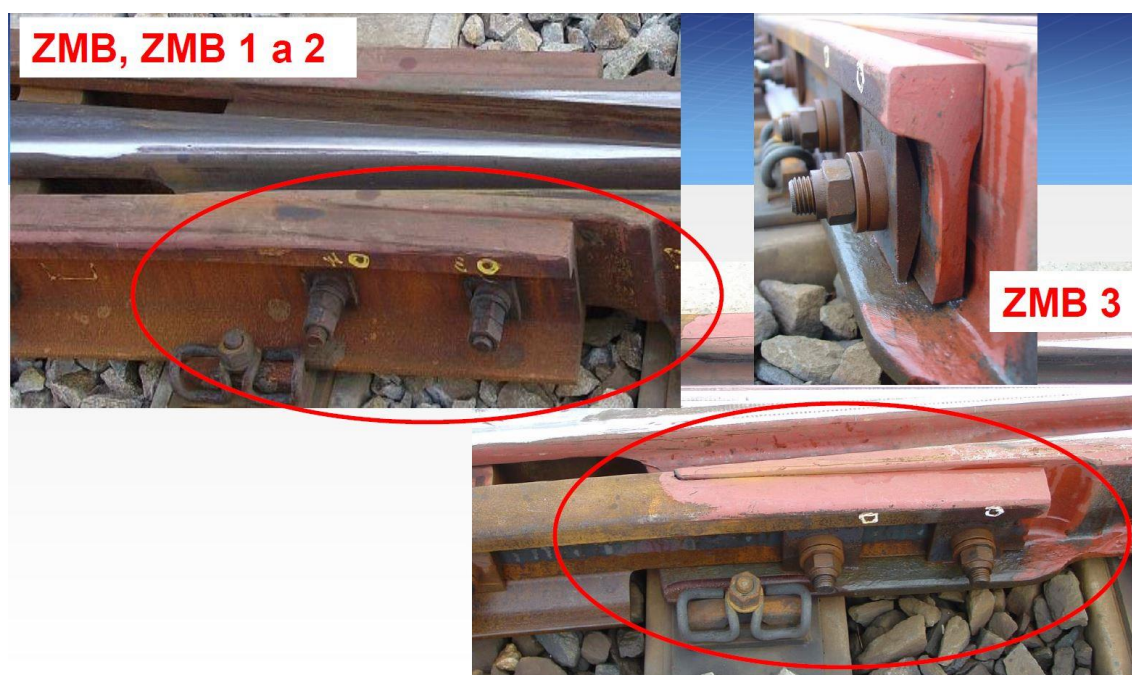
Obr. 5.4 Náčrt jednoduché srdcovky výhybky typu zkrácený monoblok [62]

Jak se ukázalo na odlitku jednoduché srdcovky typu zkrácený monoblok (označení ZMB) z bainitické oceli Lo8CrNiMo, i konstrukce samotného odlitku má zásadní vliv na životnost konstrukce. U těchto srdcovek došlo v provozu k prasknutí v příčném

směru Obr. 5.5. Po změně konstrukce odlitku (Obr. 5.6) se zdá být tento problém vyřešen (nový typ srdcovky ZMB 3). V podstatě došlo ke změně uchycení, kdy srdcovka ZMB je uchycena ke křídlovým kolejnicím, zatímco u srdcovky ZMB 3 je upevnění uchyceno přímo k odlitku srdcovky. U odlitku byl rovněž změněn materiál na Lo17MnCrNiMo [58].



Obr. 5.5 Příčné prasknutí srdcovky typu ZMB [58]

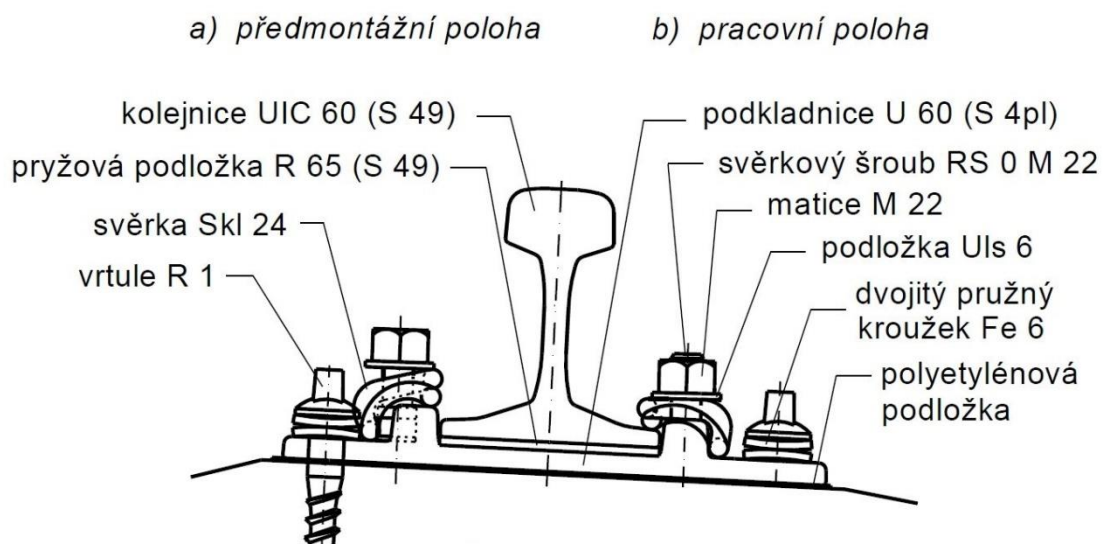


Obr. 5.6 Konstruktivní změna srdcovky typu ZMB na ZMB 3 [58]

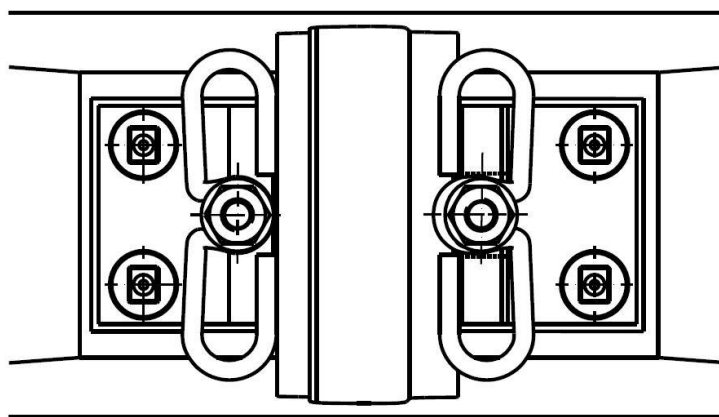
5.3. Systém upevnění srdcovky

Dalším kritickým prvkem v konstrukci výhybek je systém upevnění. Ve výhybce je mnoho druhů upevnění, nicméně vzhledem k zaměření své práce se budu soustředit na systém upevnění v srdcovkové části výhybky. V České republice se v srdcovkové části výhybky používá systém upevnění KS [64], jedná se o upevnění se svěrkami Vossloh Skl 24 (dříve Skl 12) na žebrové podkladnici U 60. Ukázka upevnění je na Obr. 5.7

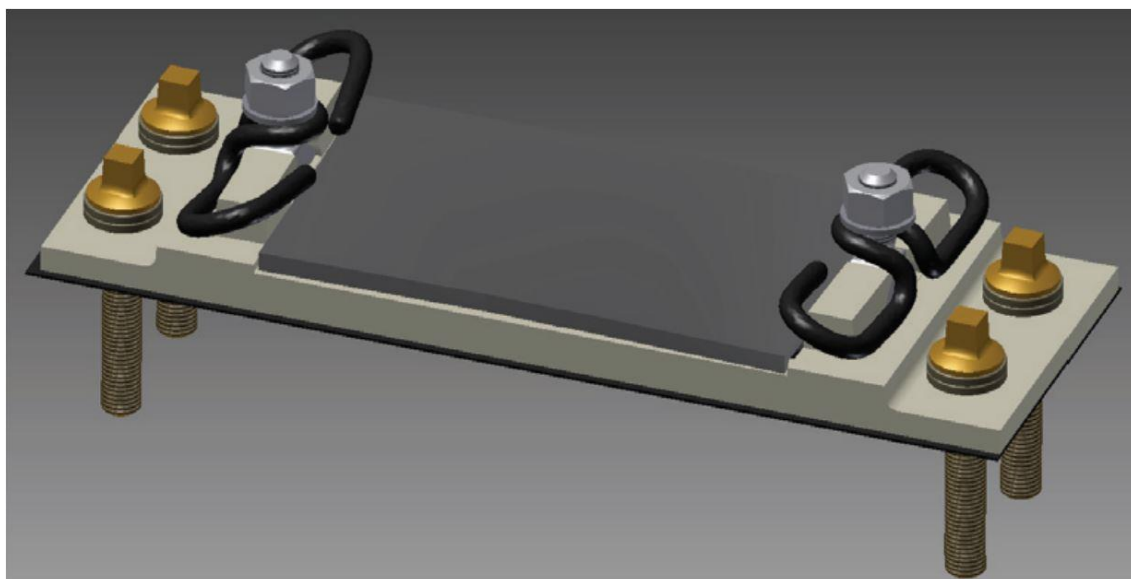
a Obr. 5.8. Tento uzel upevnění je z hlediska dynamických účinků poměrně tuhý, proto je snaha o zpružnění uzlu upevnění. Společnost DT – Výhybkárna a strojírna, a.s. ve spolupráci s ČVUT v Praze a VUT v Brně řeší projekt „Zvýšení kvality jízdní dráhy ve výhybkách pomocí zpružnění“. Jde o vývoj a ověření nového uzlu upevnění, který zpružní celý systém a sníží tím i dynamické účinky. Na tomto projektu jsem také spolupracoval v části zabývající se experimentálním ověřením nového systému upevnění v podmínkách plného provozu. Návrh nového uzlu upevnění je na Obr. 5.9.



Obr. 5.7 Řez systémem upevnění KS [64]

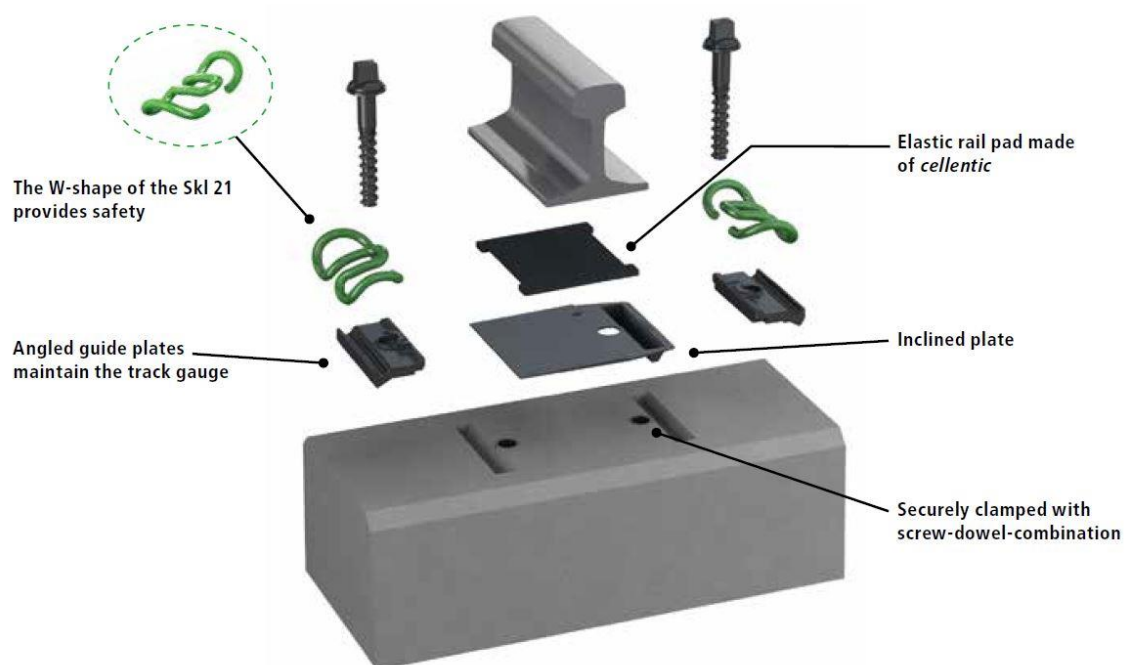


Obr. 5.8 Pohled shora na systémem upevnění KS [64]

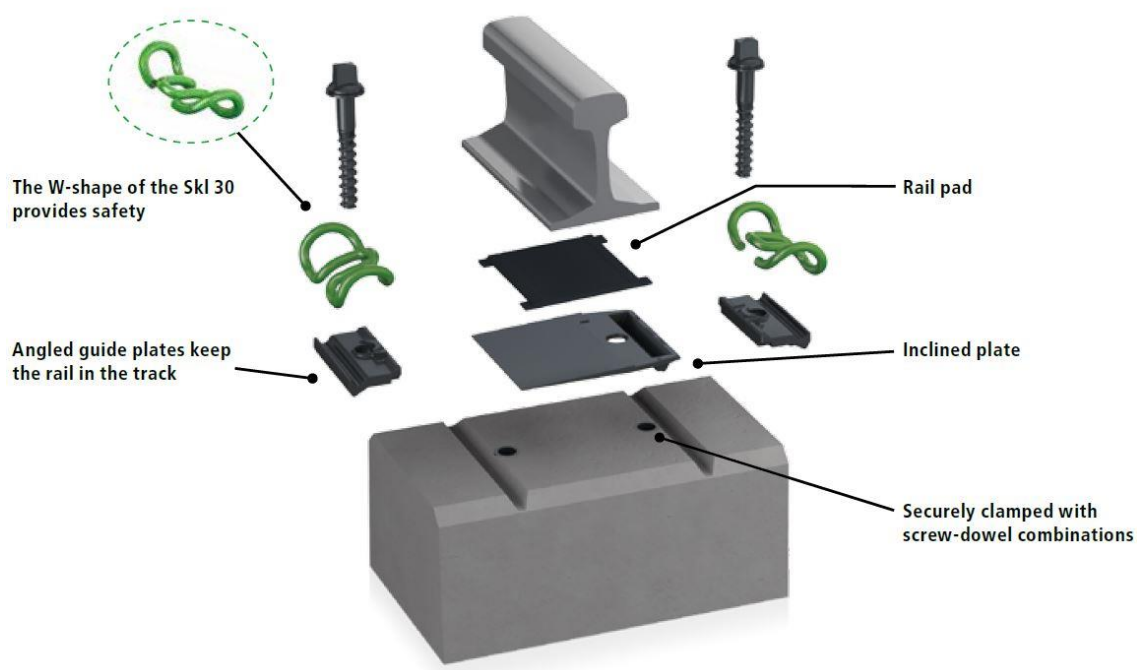


Obr. 5.8 3D pohled na nový systém upevnění TA3718 [65]

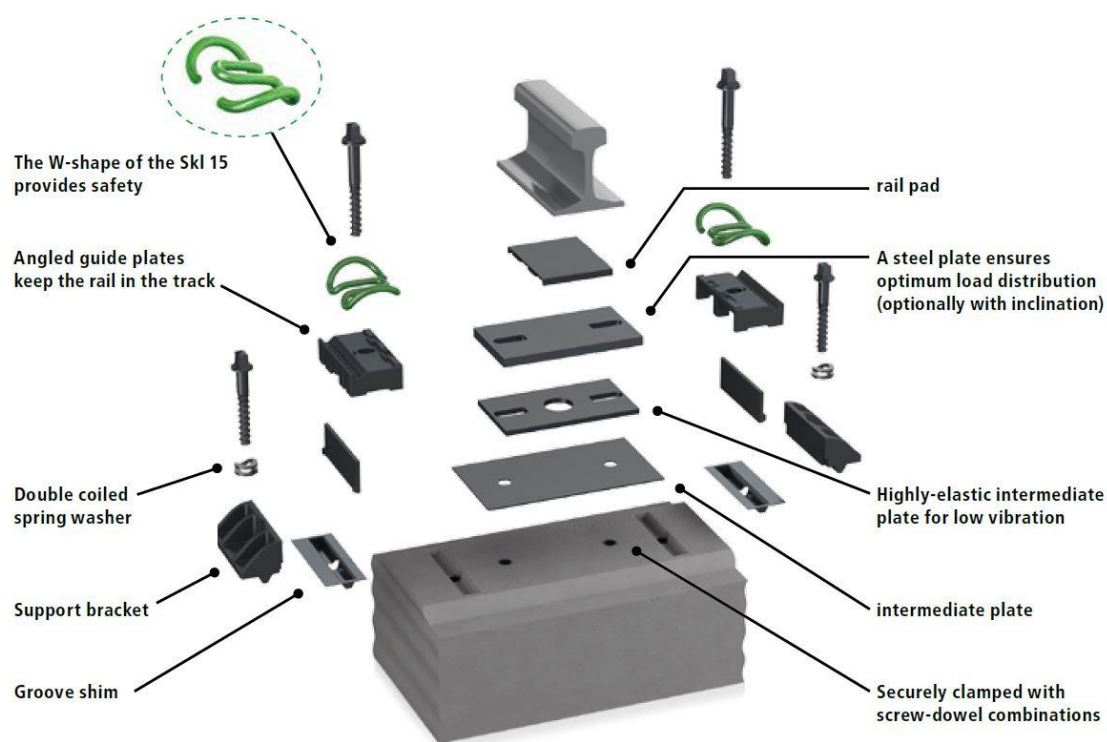
I u nás dominantně používaný systém upevnění Vossloh nabízí několik typů upevnění, které jsou optimalizovány pro výhybky a výhybkové konstrukce, například systém W 21 T (Obr. 5.9), systém W 30 T (spíše pro těžkou dopravu, používá se v Rusku) - Obr. 5.10 a systém 300 W (ten je ale vyvinut pro výhybky na pevnou jízdní dráhu) - Obr. 5.11.



Obr. 5.9 Systém upevnění Vossloh W 21 T [66]



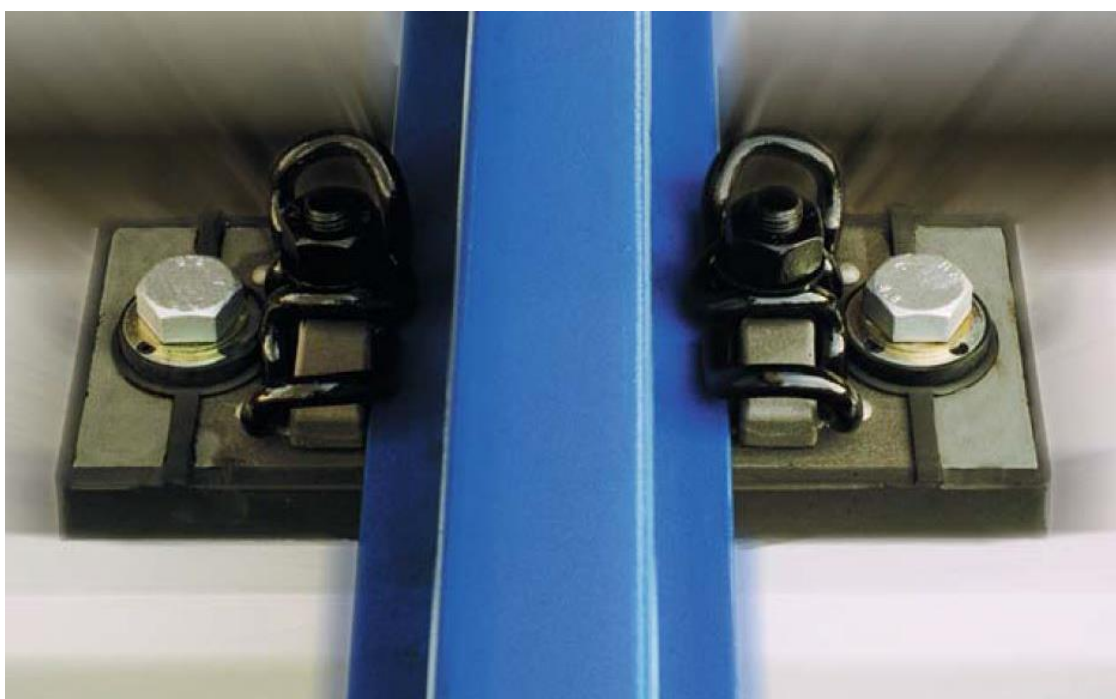
Obr. 5.10 Systém upevnění Vossloh W 30 T [67]



Obr. 5.11 Systém upevnění Vossloh 300 W [68]

Z hlediska zpružnění je velmi zajímavý systém upevnění od firmy Voestalpine BWG GmbH & Co KG. Jedná se v podstatě o vulkanizovanou podkladnici (Obr. 5.12). Tento systém upevnění je u nás již použit na dvou výhybkách v železniční stanici Poříčany, konkrétně na výhybce č. 10 a 11 (Obr. 5.13) a jsou s ním velmi dobré zkušenosti,

přestože je jedna výhybka v přechodové oblasti mostu. Systém nese označení ERL a je vyráběn ve dvou variantách: vysoce pružný ERL 17.5 (tuhost uzlu upevnění je 17,5kN/mm) a polo-pružný ERL 30 (tuhost uzlu upevnění je 30kN/mm). Systém upevnění ERL je velmi podobný systému upevnění KS, který je používán u nás, ale s několika podstatnými rozdíly. Ten největší je, že podkladnici tvoří vulkanizovaný elatomer, která je krytá plechem s žebry, ke kterému jsou přichyceny svěrky držící patu kolejnice. Dle materiálu firmy Voestalpine BWG GmbH & Co KG je střední tuhost koleje s tuhým upevněním 135 kN/mm, zatímco s upevněním ERL 30 je to 85kN/mm a s upevněním ERL 17,5 je to 62 kN/mm [69]. Jde tedy o nezanedbatelné zpružnění celého systému vozidlo-kolej. Systém ERL 17,5 je doporučován pro rychlosti nad 200 km·h⁻¹ a systém upevnění ERL 30 pro rychlosti mezi 160 km/h až 200 km/h [69].



Obr. 5.12 *Systém upevnění ERL [69]*



Obr. 5.13 *Systém upevnění ERL na výhybce č. 10 v žst. Poříčany*

5.4. Podpražcové podložky (USP – under sleeper pads)

Klíčovou záležitostí je z hlediska přenosu vibrací ochrana šterkového lože, které je v celém systému nejslabším článkem [70]. Podpražcové podložky (*Obr. 5.14*) mají právě tuto funkci. Dle některých zdrojů [71] je toho dosaženo především tím, že se zvětší kontaktní plocha mezi pražcem a šterkem z 5 – 8 % bez USP až na 30 – 35 %. Zrna kameniva šterkového lože se zaklíní do pružné vrstvy USP a tím se zvětší plocha, na kterou je zatížení přenášeno. Výsledky použití USP ve výhybkách v České republice se věnuje tato práce [73], kde je i velmi dobře popsána celá problematika USP, funkce USP a její výhody. Z pohledu dynamiky se jedná o další pružný prvek, který by měl zmenšit dynamické zatížení kolejového lože, prodloužit interval opravných prací a zvýšit životnost výhybky. Zkušenosti zahraničních železničních správ jsou toho důkazem [72]. U nás se zatím nepodařilo plně prokázat přínos USP a výsledky nejsou natolik přesvědčivé, jako u zahraničních správ [74], nicméně u výhybek je z dlouhodobého hlediska velký předpoklad, že se pozitivní účinek USP projeví.



Obr. 5.14 Pražce s podpražcovými podložkami [75]

5.5. Železniční spodek

Správný návrh a provedení železničního spodku má zásadní vliv na budoucí dynamické účinky na výhybkách [30]. Všechny výše popsané opatření se minou účinkem, pokud nebude mít konstrukce železničního spodku dostatečnou deformační odolnost. Zejména projektová příprava by měla na tuto skutečnost pamatovat a geologické průzkumy v oblasti zhlaví železničních stanic by měli být provedeny podrobně a s velkou pečlivostí. Stavební dozor by pak měl dbát dodržování všech pravidel při zřizování a kontrole únosnosti železničního spodku. Chyby na železničním svršku lze odstranit, chyby na železničním spodku se odstraňují velmi těžce a s velkými náklady.

6. Metodika měření

V předchozí kapitole byly nastíněny opatření, která se v současnosti aplikují na výhybky, aby bylo dosaženo snížení dynamického namáhání. Další možností, je studium dynamických účinků, jejich monitoring, optimalizace údržby a její lepší plánování. Studium dynamického rázu a jeho šíření poskytne důležité informace, například o jeho frekvenčním složení. Pokud budeme znát klíčové frekvenční složky, které se nejvíce podílejí na výše popsáných jevech, můžeme se pokusit je vhodným konstrukčním řešením utlumit. Vliv jednotlivých konstrukčních řešení by měl být hodnocen i na základě měření dynamických účinků přímo in-situ. K tomuto účelu je nutné sestavit vhodnou metodiku, případně metodiky měření.

Hodnocení dynamických účinků na železniční svršek, případně jeho jednotlivé části, je možné v zásadě rozdělit do tří základních oblastí. Do první oblasti patří analýza šíření vibrací v jednotlivých částech svršku a zejména jejich účinky na šterkové lože. Do druhé oblasti náleží měření pohybového chování kolejového svršku. V principu jde o analýzu posunů jednotlivých částí, případně celého kolejového roštu pod zatížením. Výsledkem je charakteristika chování celého roštu nebo charakteristika chování jeho jednotlivých částí, např. pražců ve šterkovém loži. Do třetí oblasti náleží měření a analýza silového působení a napětí na kolejovém roštu. Jde o analýzu sil, které vyvozuje vlaková souprava na kolejový rošt, analýzu ohybových momentů, kolových sil atd. Lze sem však zařadit také měření tlaků a napětí na rozhraní mezi železničním svrškem a spodkem [76].

Ústav železničních konstrukcí a staveb (dále ÚŽKS) se již několik let zabývá měřením dynamicko-akustických účinků na kolejových konstrukcích. Většina měření je realizována za plného provozu v trati. Jedná se o měření prováděná v rámci bakalářských, diplomových i vědeckých prací ÚŽKS i v rámci spolupráce s ostatními katedrami. Využil jsem proto předchozích bohatých zkušeností z těchto měření a pokusil se navrhnout metodiku měření, která je dostatečně universální a komplexní. Metodika musí být také sestavena tak, aby byla aplikovatelná v podmínkách plného provozu, bez omezení a výluk. Měla by poskytnout mechanismy pro zhodnocení dynamického chování konstrukce a umožnit studium účinnosti jednotlivých konstrukčních opatření i údržbových prací. Zároveň ale nesmí být příliš rozsáhlá, aby bylo možné její praktické využití a byla zajištěna opakovatelnost měření. Nebylo jednoduché všechny tyto protichůdné aspekty skloubit. Níže uvedená metodika je v souladu s výše uvedeným a v souladu s teoretickým rozбором problematiky rozdělena na tři dílčí části. První se zabývá dynamickým chováním konstrukce a sleduje přenos vibrací z kolejnic do pražce a do šterkového lože. Druhá část je navržena tak, aby umožnila sledovat pohybové chování konstrukce pod zatížením. Poslední část metodiky je navržena pro sledování silového působení na konstrukci.

Přestože se zabývám ve své práci především oblastí srdcovky výhybky, tak jsem se v rámci projektu „Zvýšení kvality jízdní dráhy ve výhybkách pomocí zpružnění“ podílel i na tvorbě metodiky měření ve výměnové části výhybky. Ve výměnové části výhybky dochází také k dynamickému namáhání, jen jde o menší hodnoty, protože pojížděná hrana koleje není přerušena.

6.1. Metodika měření zrychlení vibrací

Dynamické účinky na konstrukce nejlépe vystihuje časový průběh zrychlení (případně rychlosti) [77]. Proto byla při tvorbě metodiky analýzy použita jistá forma vibro-diagnostiky, tedy měření veličin charakterizující dynamické účinky snímači zrychlení. Snímače zrychlení vibrací mají pro tento účel výhodné vlastnosti, především je charakterizuje široký pracovní rozsah, definovaná linearita v pracovních mezích, pevná a robustní konstrukce, vysoká spolehlivost a dlouhodobá stabilita. Výhodou je také to, že tyto snímače nemají pohyblivé části citlivé k opotřebení. Všechny tyto vlastnosti, tyto snímače předurčují pro použití v podmínkách plného provozu i pro dlouhodobé měření. Metodika měření byla navržena tak, aby bylo možné sledovat přenos vibrací z kolejnic, přes pražec až do kolejového lože a také roznos vibrací pražcem.

6.1.1. Metodika měření zrychlení vibrací v srdcovkové části výhybky

Snímače zrychlení kmitání jsou v rámci této metodiky umístěny 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. 6.1*). 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 v místě kde kolo přechází z křídlové kolejnice na hrot srdcovky, 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.

Pražec 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 přenesou pražcem až do osy koleje. I přesto, že je při zřizování železniční dopravní cesty podbíjen pražec zejména v oblasti jeho hlav, tvoří se pod hlavami pražců vlivem provozu volné prostory. Následně je pražec podepřen v ose koleje[22]. Z tohoto důvodu je důležité začlenit snímače na hlavy pražců. Umístění snímačů bylo zvoleno následovně:

- 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. 6.1). Snímač A0Z je v ose mezipražcového prostoru 200 mm od osy kolejnice (viz Obr. 6.1). Třiosý snímač (A4Z, A5X, A6Y) je umístěn co nejbližší uzlu upevnění na patě křídlové kolejnice (viz Obr. 6.1). Snímače A2Z a A7Z jsou umístěny v ose kolejí a na ose pražce (viz Obr. 6.1).

6.1.2. Metodika měření zrychlení vibrací ve výměnové části výhybky

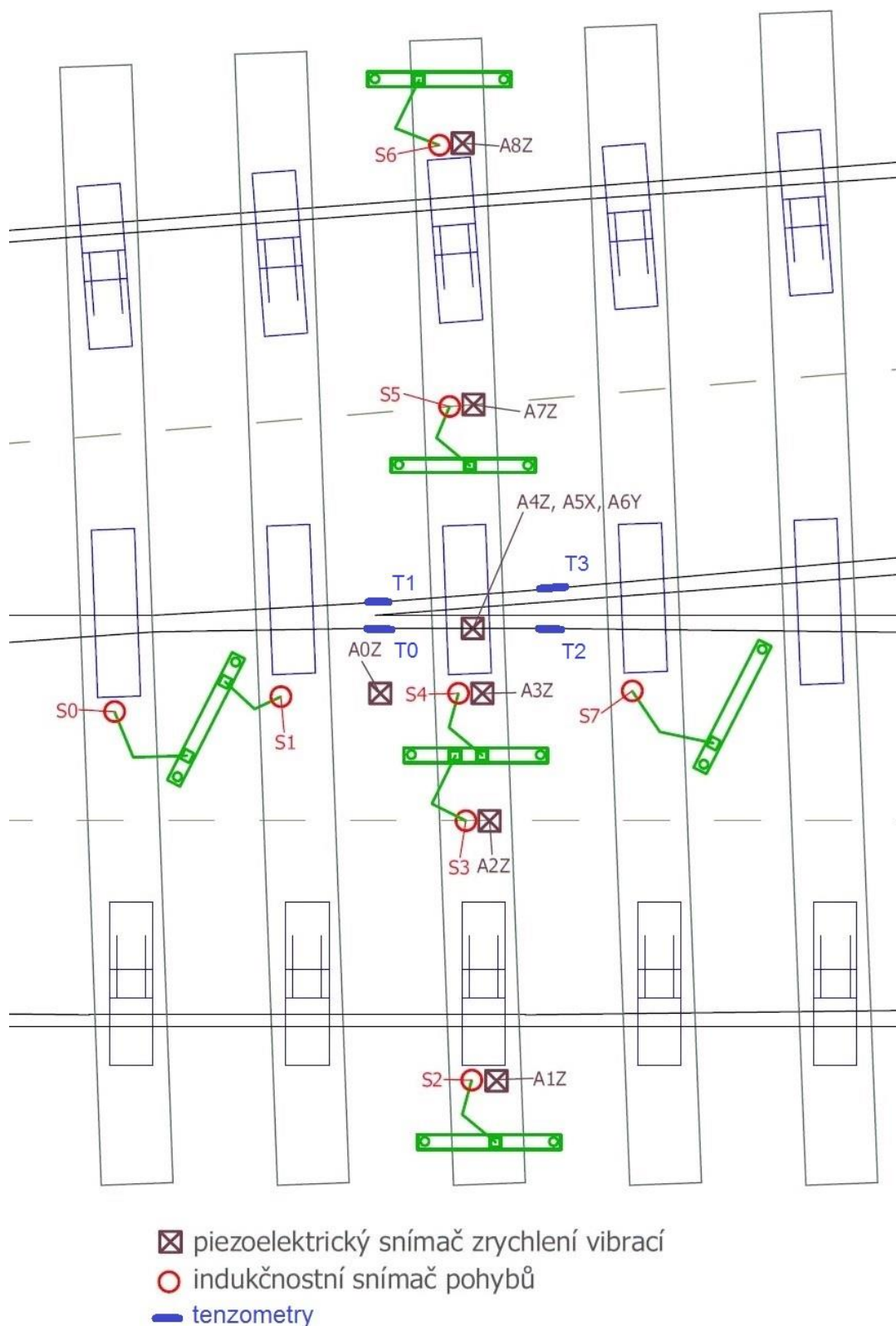
Mechanismus přenosu vibrací je u výměnové části (Obr. 6.2) obdobný jako u oblasti srdcovkové s předpokladem nižších hodnot vibrací. Je to způsobeno nepřerušovanou pojížděnou plochou kolejnice, kdy nákok postupně najíždí a opírá se o jazykovou kolejnici. Intenzita vibrací je tlumena kolejovým roštem, kdy malá část je utlumena již v kolejnici a její pryžovou podložkou. K dalšímu utlumení vibrací dojde v pražci, kde neutlumená složka je přenášena do štěrkového lože. I proto je metodika měření navržena obdobným způsobem, jako tomu bylo v oblasti srdcovky. Je sledován přenos vibrací z kolejníc, přes pražce až do štěrkového lože a roznos vibrací určeným pražcem. Snímače jsou umístěny do místa, kde kolo přechází z ohnuté opornice na přímý jazyk. Je třeba u každé výhybky přibližně stanovit pražec, který je uprostřed tohoto přechodu, neboť se s velkou pravděpodobností jedná o nejvíce namáhaný pražec. Snímače A3Z a A7Z jsou umístěny na patě ohnuté opornice, snímače A1Z a A2Z jsou umístěny na hlavě pražce a snímač A0Z na tyči ve štěrkovém loži. Délka tyče je 80 cm a je zatlučena do štěrkového lože do hloubky 65 cm, průměr tyče je 20 mm. Tyč slouží jako vlnovod. Třiosý snímač je umístěn na přímý jazyk v mezipražcovém prostoru (mezi snímače A3Z a A7Z). Tento snímač bude sledovat vibrace přenášené do přímé jazykové kolejnice, která není tak dobře upevněna jako opornice a lze zde očekávat větší zrychlení vibrací ve všech třech směrech (svislém A4Z, podélném A5X a příčném A6Y). Snímače A2Z, A8Z a A9Z budou sledovat roznos vibrací pražcem. Větší dynamické účinky lze

očekávat při průjezdu výhybky v přímém směru plnou traťovou rychlostí, proto byla pro analýzu vybrána oblast ohnuté opornice a přímého jazyka.

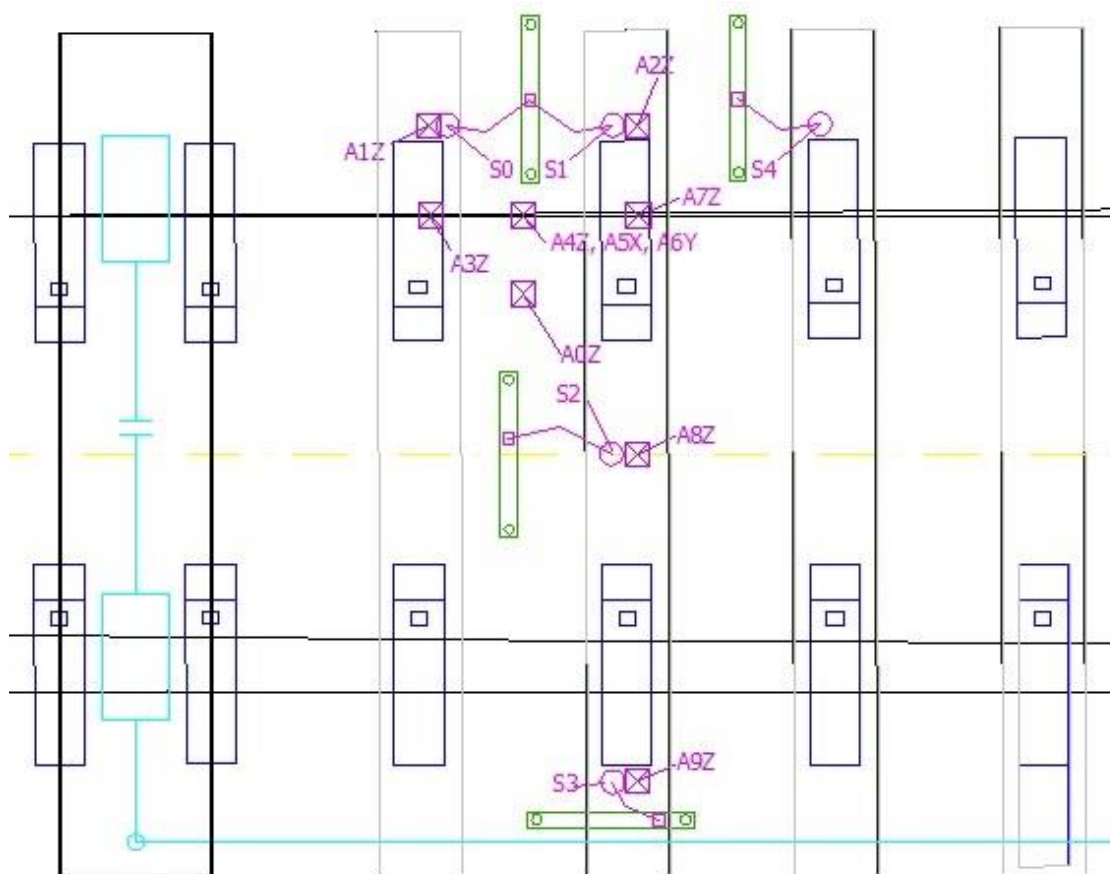
Umístění snímačů bylo zvoleno následovně:

- A0Z – na tzv. měřicí tyči o délce 80 cm a průměru 20 mm, která je zapuštěna do štěrkového lože
- A1Z – na hlavě pražce před určeným pražcem (ve směru jízdy proti hrotu) na straně přímého jazyka
- A2Z – na hlavě pražce na určeném pražci na straně přímého jazyka
- A3Z – na patě ohnuté opornice nad pražcem, který je před určeným pražcem
- A4Z, A5X, A6Y – tříosý snímač na přímé jazykové kolejnici v mezipražcovém prostoru
- A7Z – na patě ohnuté opornice nad určeným pražcem
- A8Z – na určeném pražci v ose koleje
- A9Z – na hlavě pražce na určeném pražci na straně ohnutého jazyka

Snímače A1Z, A2Z, A9Z jsou umístěny 200 mm od osy kolejnice a v podélné ose pražce (viz *Obr. 6.2*). Snímač A0Z je v ose mezipražcového prostoru 300 mm od osy kolejnice, ale vždy tak, aby nebránil při přestavění výhybky (viz *Obr. 6.2*). Tříosý snímač (A4Z, A5X, A6Y) je umístěn v ose mezipražcového prostoru a na jazykové kolejnici a nejlépe zespodu na ní uchycen (viz *Obr. 6.2*). Snímač A8Z je umístěn v ose koleje a na ose pražce (viz *Obr. 6.2*). Snímače A3Z a A7Z jsou umístěny co nejblíže uzlu upevnění na patě opornice z vnější strany (viz *Obr. 6.2*).



Obr. 6.1 Rozmístění snímačů pohybu (posunu), vibrací a napětí, srdcovková část



Obr. 6.2 Rozmístění snímačů pohybu (posunu) a vibrací, výměnová část

6.1.3. Metodika měření – výběr snímačů zrychlení vibrací

Při výběru snímačů pro měření zrychlení vibrací jsem vycházel z předchozích realizovaných měření [29, 30, 79]. Z širokého spektra snímačů, které byly na ÚŽKS k dispozici jsem vybral akcelerometry od firmy Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement A/S. Nejlepší variantou pro měření v terénu jsou snímače s TEDS (Transducer Electronic Data Sheet), tedy takové, které mají vestavěnou paměť s údaji pro jednodušší a rychlejší instalaci, výrazně to šetří čas na měření. Snímače typu B001 a B004 jsou také vybaveny drážkou pro snadnější instalaci do plastových podložek (Obr. 6.3), které lze jednoduše přilepit ke konstrukci sekundovým lepidlem. Jde o stabilní připevnění ke konstrukci, bez ovlivnění výsledku měření. Připevnění pomocí včelího vosku je v teplých dnech značně nestabilní a v zimě se zase s voskem hůře manipuluje. Vybrané snímače mají pevné titanové pouzdro, jsou mimořádně mechanicky odolné, velmi spolehlivé a proto vhodné pro měření v terénu. Jistou nevýhodou snímačů je jejich vysoká cena. Pro měření na kolejnicích jsem vybral jednoosé snímače typy 4507 B001 a 4508 B001 a tříosé typu 4524 B001. Všechny mají vhodný frekvenční rozsah a hodnotu maximálního zrychlení $7000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, respektive $5000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ (4508 B001). Z předchozích měření se ukázalo [29, 30, 79], že maximální měřené hodnoty se pohybují okolo $2500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Na pražcích jsem se rozhodl pro snímače

typu 4507 B004 s maximální hodnotou zrychlení vibrací $700 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, na výhybkách ve špatném stavu se ukázalo, že některé vlaky mohou maximální zrychlení $700 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ na pražci překonat, proto na takových konstrukcích navrhuji použít na pražci snímače 4507 B001. Pro měření ve šterkovém loži jsem vybral snímače 4507 B004. Níže v *Tab. 6.1* jsou shrnuty charakteristiky vybraných snímačů.



Obr. 6.3 Akcelerometr uchycený do platové podložky, která je přilepena sekundovým lepidlem na křídlové kolejnici

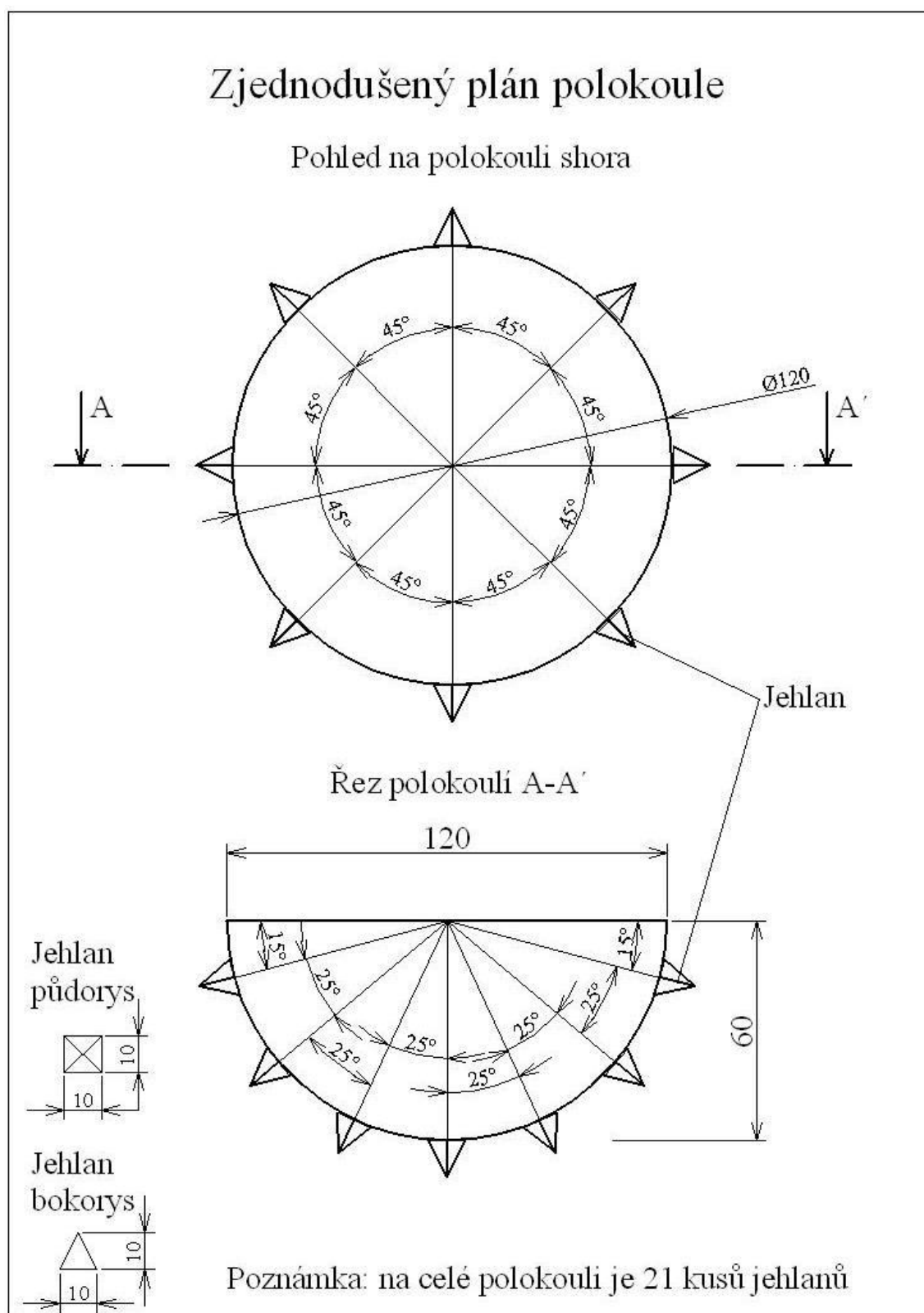
Typ	Citlivost [mV/ms ²]	f rozsah [Hz]	Hmotnost [g]	Max. zrychlení [m·s ⁻²]
4507 B001	1	0,1 – 6000	5	7000
4508 B001	1	0,1 – 8000	5	7000
4507 B004	10	0,3 – 6000	5	700
4524 B001	1	0,2 – 5000	18	5000

Tab. 6.1 charakteristiky vybraných snímačů zrychlení

6.1.4. Měření zrychlení vibrací ve šterkovém loži

V rámci metodiky předpokládám měření zrychlení vibrací pomocí vhodného přípravku – tyče, která slouží jako vlnovod. Vyzkoušel jsem i jiné způsoby měření zrychlení vibrací ve šterkovém loži. V rámci své diplomové práce jsem vyvinul a nechal vyrobit měřicí polokouli, která byla u několika měření rovněž úspěšně použita. Navržená měřicí polokoule je osazena jehlany o délce základny 1 cm a stejné výšce, po polokouli je jich takto rozmístěno 21 kusů (*Obr. 6.4, 6.5 a 6.6*). Polokoule je o průměru 12 cm, tento rozměr nebyl určen náhodou, jedná se o zhruba dvojnásobek velikosti zrna šterku. Díky tomu ve šterkovém loži lépe sedí. Polokoule je z litiny a její hmotnost je něco přes 4 kg. Výhodou polokoule je, že ji zrna šterku obklopují ze všech stran a díky jehlanům je mezi ně i dobře vklíněna. Z důvodu opakovatelnosti měření i jinými subjekty a vzhledem k tomu, že i tyč zatlučená do šterku dávala dobré výsledky, jsem se rozhodl polokouli nakonec z metodiky vypustit. Je za tím i snaha získat pro metodiku měření certifikaci a používání unikátních pomůcek by to mohlo tuto snahu ztížit.

Nejlepším řešením, je měření zrychlení vibrací ve štěrkovém loži pomocí měřicích kamenů. Zabudování měřicího kamene do štěrku přímo pod srdcovkou, je pro výhybky v provozu velmi obtížné. Navíc by se instalací porušilo podepření srdcovky ve velmi citlivém místě. Proto je vhodné měřicí kámen instalovat do štěrkového lože v rámci stavby. V rámci projektu „Zvýšení kvality jízdní dráhy ve výhybkách pomocí zpružnění“ byl měřicí kámen vyvinut a vložen přímo pod srdcovku výhybky. Měřicí kámen tvoří akcelerometry vestavěné do štěrkového zrna. Pro tento účel jsou nejvhodnější akcelerometry typu MEMS, které jsou malé s dostatečnou citlivostí a napěťovým výstupem (Obr. 6.7). Senzor je nutno zabudovat do vhodného štěrkového zrna a opatřit výstupní kabeláží. Po konzultacích i zkušebních testech, byla vybrána k výrobě měřicího kamene hornina typu droba, která se s ohledem na vlastnosti jeví jako nejvhodnější materiál. Jedná se o sedimentární horninu tmavě šedé až černé barvy, psamitické frakce tvořené zrnky křemene, živců a úlomků hornin s až 20 procentním podílem jílovito-prachovité matrix. Jde o hominu, která se ve stavební praxi používá poměrně často. Svými vlastnostmi je vhodná pro přípravu drceného kameniva požadovaných frakcí a vyhovujícího tvarového indexu pro kamenivo používané v konstrukci železničního štěrkového lože. Vybraný vzorek kamene byl opracován, do vzorku se vyvrtal otvor takového průměru, aby do něj bylo možné vložit a zaklínit vlastní akcelerometrický snímač a ten je poté zalit zalévací hmotou pro elektroniku. K zabudování byl použit tříosý akcelerometr. Otvor, kterým prochází kabel, byl uzavřen hliníkovou zátkou s průchodkou na vyvedení měřicího kabelu. Měřicí kabel byl při zabudovávání do štěrkové vrstvy chráněn před poškozením plastovou chráničkou. Realizovaný měřicí kámen je zobrazen na Obr. 6.8. V zahraničí měření pomocí měřicích kamenů bylo také několikrát realizováno [81, 82, 83].



Obr. 6.4 Plán na výrobu měřicí polokoule



Obr. 6.5 *Pohled na hotovou měřicí polokouli*



Obr. 6.6 *Měřicí polokoule instalovaná ve štěrkovém loži s akcelerometrem*



Obr. 6.7 Snímač zrychlení typu MEMS včetně desky plošného spoje



Obr. 6.8 Hotový měřicí kámen

6.2. Pohybové chování konstrukce

K měření posunů na jednotlivých částech kolejového roštu jsem vybral přímé měření délek (posunů) pomocí indukčnostních snímačů délek. Tato metoda vyžaduje existenci tzv. srovnávacího bodu. 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. Vztažným (srovnávacím) bodem je myšlen rám, tvořený dvěma ocelovými tyčemi délky 80 cm a průměru 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. Stejně jako u měření vibrací jsem metodiku navrhl pro srdcovkovou část výhybky i pro část výměnovou. Schéma rozmístění snímačů použitých pro měření a analýzu pohybové chování je zřejmé z obrázků Obr. 6.1 a Obr. 6.2.

6.2.1. Metodika měření pohybového chování konstrukce v srdcovkové části výhybky

Z obrázku *Obr. 6.1* je patrné, že v oblasti srdcovky bylo navrženo 8 snímačů posunu. Snímače S0, S1, S4 a S7 jsou instalovány podél srdcovky výhybky. Údaje z těchto snímačů umožní vykreslit průhybovou křivku, která po délce srdcovky vzniká. Maximální průhyb je předpokládán u pražce přímo pod srdcovkou. Tato skutečnost je předpokládána na základě předchozích měření [30, 79]. Takto je možné vykreslit průhybové křivky při průjezdu vlakových souprav nebo průhybové křivky pod hnacími vozidly. Lze tak získat komplexní informaci o pohybovém chování pražců po délce srdcovky výhybky. Podotkněme, že snímač S0 je umístěn na 2. pražec před hrotem srdcovky, S1 je umístěn na 1. pražec před hrotem srdcovky, S4 je umístěn na pražec pod místem přechodu z křídlové kolejnice na hrot srdcovky a S7 je umístěn na 1. pražec za tímto místem, vše ve směru proti hrotu srdcovky dle *Obr. 6.1*.

Snímače S2, S3, S4, S5 a S6 v této metodice jsou rozmístěny po délce výhybkového pražce pod místem přechodu z křídlové kolejnice na hrot srdcovky tak, aby sledovaly jeho pohybové chování. Jde o nejvíce zatížený výhybkový pražec. 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 [22, 29, 30, 52, 80]. Z tohoto důvodu je snímač pohybu 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 [22, 80]. 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 posunu 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. 6.1*). Snímače S3 a S5 jsou v ose kolejí a na ose pražce (viz *Obr. 6.1*).

6.2.2. Metodika měření pohybového chování konstrukce ve výměnové části výhybky

Obdobné je rozmístění snímačů ve výměně, viz *Obr. 6.2*. Navrhl jsem 5 snímačů posunu. Snímače v podélném směru vůči ose koleje S0, S1, S4 jsou upevněny podél přímého jazyka výhybky. Snímače jsou umístěny do místa, kde kolo přechází z ohnuté

opomíci na přímý jazyk. Je třeba u každé výhybky přibližně stanovit pražec, který je uprostřed tohoto přechodu, neboť se s velkou pravděpodobností jedná o nejvíce namáhaný pražec. Snímače je poté třeba umístit následovně: S0 – na pražec za určeným pražcem, S1 – na určený pražec, S4 – na pražec před určeným pražcem, vše ve směru jízdy vlaku proti hrotu výhybky. Tyto snímače umožní vykreslit křivku průhybů, ale také maximální zatlačení pražců pod výměnou. Snímače S2, S3 a S4 budou rozmístěny na určený pražec v kolmém směru k ose koleje, tedy podél tohoto pražce. Umístění snímačů jsem zvolil následovně – S0, S1, S3, S4 umístěné na hlavě pražce, S2 umístěn v ose koleje a na ose pražce. Snímače posunu S0, S1, S3, S4 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. 6.2*). Měření doporučuji realizovat při přejezdu soupravy přímoú větví výhybky, která je pojížděna plnou traťovou rychlostí.

6.2.3. Metodika měření – výběr snímačů pohybu

Výběr vhodných snímačů pro pohybové chování výhybky byl poměrně jednoduchý. Z mnoha důvodů je složité a na některých místech i neproveditelné použití laserových snímačů, které budou upevněny na pevném bodě mimo kolej. Především by nebylo možné měřit pohyby pražců v ose koleje, kde by byl paprsek laserového snímače vždy přerušen projíždějícím kolem. Stejný problém by nastal při měření pohybů pomocí vysokorychlostní kamery. Jediným možným způsobem měření je vytvoření pevného bodu přímo v koleji. To sebou samozřejmě nese určitá omezení. Především není možné zachytit absolutní pohyby konstrukce. Nicméně je předpoklad, že rozdíly mezi absolutními pohyby konstrukce a měřenými pohyby je natolik malý, že to můžeme zanedbat. Jediným možným řešením je dvojná integrace zrychlení na pohyb. Tato metoda má také svá omezení. Problém je především v délce měřeného signálu a ve vhodné filtraci. Pokud se budeme snažit integrovat signál od celého vlaku, pak to bude velmi složité, neboť nízké frekvence nám nedovolí reálné zobrazení pohybů, lidově řečeno nám signál zcela uplave a zobrazené pohyby nebudou reálné. Pokud naopak nízké frekvence odfiltrujeme, pak nemůžeme získat reálný signál pohybů, které jsou realizovány především v oblasti nízkých frekvencí do 5 až 10 Hz. Částečně úspěšní budeme, pokud dokážeme signál vhodně vyfiltrovat a zároveň zkrátit na průjezd jednoho kola, případně nápravy. Každopádně nezískáme tak komplexní informaci, jako při měření se srovnávacím bodem pomocí indukčních snímačů pohybu. Pro měření pohybů konstrukce výhybky jsem se proto rozhodl pro využití indučních snímačů pohybu od firmy Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, typ WA-10 T, které jsou dostatečně robustní, odolné (prachu a vodě těsné) a mají dostatečný pracovní rozsah 10 mm (*Obr. 6.9*).



Obr. 6.9 Snímač pohybu umístěný na pražci a uchycený do magnetického držáku

6.3. Měření deformace (napětí) v konstrukci

V rámci projektu „Zvýšení kvality jízdní dráhy ve výhybkách pomocí zpružnění“ jsem se rovněž podílel na vytvoření níže uvedených metodik měření deformace (napětí) v konstrukci výhybek. Měření je možné principiálně rozdělit na dvě části. První se týká měření deformace na konstrukci železničního svršku pomocí tenzometrických snímačů a lze ho zrealizovat i dodatečně po položení výhybky. Naopak u druhé části, kterou je měření normálového napětí v konstrukci pražcového podloží. Je vhodné snímače zabudovat přímo do prostoru jednotlivých vrstev konstrukce koleje tak, aby nedocházelo k poškození snímačů a snímače poskytovaly korektní hodnoty.

6.3.1. Měření deformace (napětí) na křídlové kolejnici

Jak již bylo popsáno v teoretickém rozboru problematiky, tak srdcovka výhybky je rovněž zatěžována ohybovým momentem. Z hlediska životnosti se jedná o velmi důležitou záležitost, proto je do metodiky měření dynamických účinků zařazeno i měření deformace (napětí) na patě křídlových kolejnic. Ke sledování deformací a silového působení jsem navrhl čtyřmi tenzometrické snímače. Jejich umístění na patě křídlových kolejnic je patrné z obrázku Obr. 6.1. Místo přechodu kola z křídlové kolejnice na hrot srdcovky je u většiny výhybek nad pražcem, proto je zvolena čtveřice tenzometrů, dva jsou umístěny v mezipražcovém prostoru před místem přechodu a dva

v mezipražcovém prostoru za místem přechodu. Všechny tenzometry navrhuji umístit v ose mezipražcového prostoru. Pokud je to možné, pak navrhuji tenzometry staticky kalibrovat, aby bylo možné vypočítat kolovou sílu.

V navržené metodice předpokládám využití foliových odporových tenzometrů. Doporučuji aplikaci tenzometrů typu 1-LY11-6/120 (výrobce HBM, Německo). Pro nalepení doporučuji jednosložkové lepidlo Z70. Na nainstalované tenzometry je nezbytné aplikovat krycí tmel (např. ABM75 – silikonový tmel s hliníkovou fólií). Doporučuji nainstalované tenzometry zapojit třívodičově do čtvrtmostů k příslušné měřicí ústředně. Zjištěné hodnoty poměrných deformací je nutné přepočítat na hodnoty mechanického napětí podle vztahu (6.1).

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (6.1)$$

kde σ je mechanické napětí, E je Youngův modul pružnosti, uvažováno $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Pa a ε je měřená poměrná deformace.

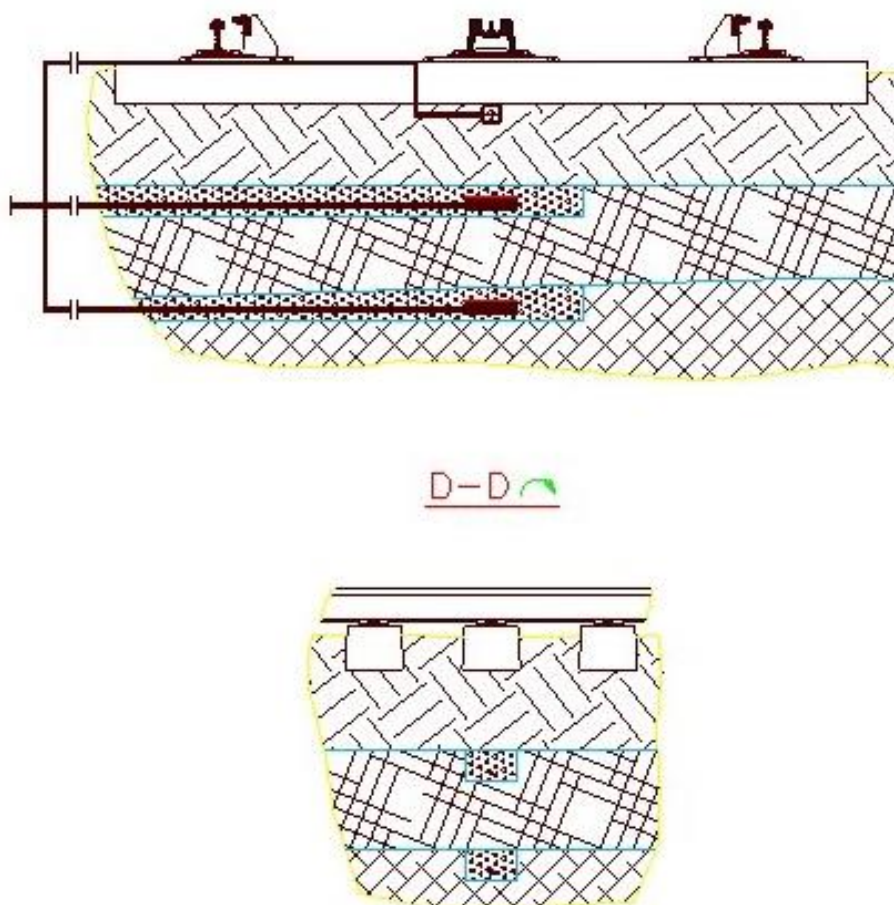
Instalace tenzometrů na již provozovanou výhybku je časově náročná (je třeba mezera mezi vlaky alespoň 10 minut), proto ne na každé konstrukci je to z hlediska bezpečnosti pracovníků v koleji možné. Doporučuji tedy instalaci tenzometrů v době výluky, nebo při ukládání výhybky.

6.3.2. Měření napětí v konstrukci pražcového podloží

K měření napětí v konstrukci pražcového podloží jsou nejvhodnější tlakové talířové snímače, které byly již několikrát s úspěchem použity [85]. Na základě předchozích měření byly zvoleny snímače s následujícím rozsahem:

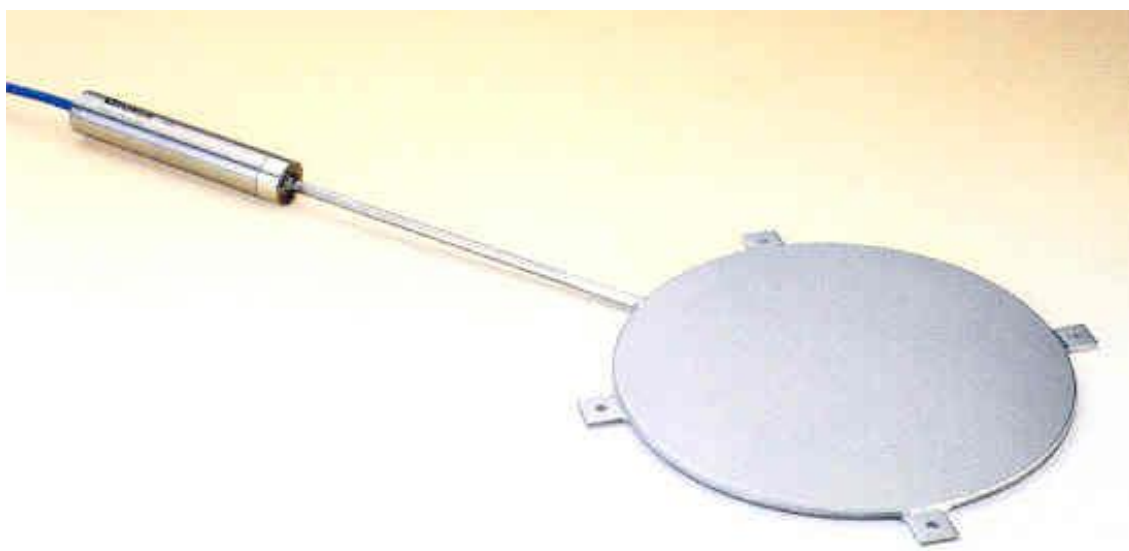
- pro zemní pláš s rozsahem do 100 kPa
- pro pláš tělesa železničního spodku do 250 kPa

Na zemní pláni je snímač uložen na geotextilii ve vrstvě ze štěrkopísku, v oblasti pláně tělesa železničního spodku je snímač umístěn pod plání tělesa železničního spodku, v konstrukční vrstvě ze štěrkodrti. Umístění snímačů je vidět na *Obr. 6.10*.



Obr. 6.10 Umístění tlakových snímačů v pražcovém podloží [86]

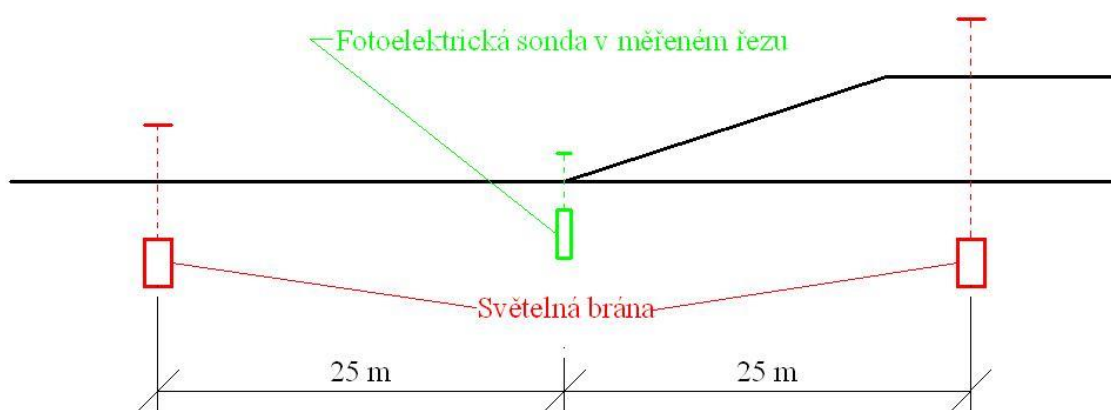
K měření normálového napětí v konstrukci pražcového podloží výhybky je vhodné využít tlakové snímáče firmy Geokon řady 3500 nebo podobné. Průměr snímáče je 230 mm, tloušťka snímáče 12 mm (Obr. 6.11).



Obr. 6.11 Tlakový snímáč řady 3500 firmy Geokon [87]

6.4. Doplnění měřicí sestavy o spouštěcí mechanismus

Metodiku měření je možné doplnit o spouštěcí mechanismus, který zajistí, že bude měření spuštěno u všech vlaků stejně a ve stejném řezu a také o zařízení schopné identifikovat jednotlivá kola vlaku v měřícím řezu. Vhodným spouštěcím mechanismem mohou být například světelné brány. Spouštění a ukončení měření za pomoci světelných bran by mohlo vypadat následovně. První světelná brána bude umístěna 25 m před měřeným řezem na ve výšce asi 1,5 m nad temenem kolejnice. Po přerušení paprsku světelné brány lokomotivou vlaku bude měření spouštěno (na všech snímačích i na fotoelektrické sondě). Druhá světelná brána bude umístěna pro změnu 25 m za měřeným řezem. Jakmile lokomotiva protne druhou světelnou bránu, tak měření bude i nadále pokračovat. Nicméně z rozdílu času, za který lokomotiva ujela 50 m, bude možné velmi přesně spočítat rychlost vlaku. Měření bude vypnuto manuálně, jakmile bude poslední vůz vlaku bezpečně za druhou světelnou branou. V měřeném řezu bude za pomoci fotoelektrické sondy, jejíž paprsek bude nastaven asi 2 mm nad temenem kolejnice, možné identifikovat jednotlivá kola vlaku. Schéma měřicího stanoviště a rozmístění světelných bran je patrné z Obr. 6.12.



Obr. 6.12 Schéma měřicího stanoviště

Díky světelným branám a fotoelektrické sondě je možné u každého vlaku vybrat přesně určený časový úsek, který bude odpovídat působení vlaku na předem vybraném úseku konstrukce. Výběr signálu pro hodnocení je zřejmý z Obr. 6.13. V rámci interního projektu FAST VUT v Brně č. 329 (rok 2009), kde jsem byl hlavním řešitelem, byla zakoupena fotoelektrická sonda MM 0024 (Obr. 6.14) od firmy Brüel & Kjær, která má vhodné vlastnosti pro použití do spouštěcího mechanismu.



Obr. 6.13 Výběr části signálu pro hodnocení



Obr. 6.14 Fotoelektrická sonda MM 0024 [84]

7. Matematický aparát

Při měření dynamických účinků od kolejových vozidel přímo in-situ, což je těžištěm disertační práce, je třeba popsat a vyhodnotit stochastický a přechodový signál, a to je poměrně obtížné. Přesto lze i s takovýmto signálem, za použití moderních matematických postupů, pracovat a objektivně ho zhodnotit. Aby bylo možné získat potřebné informace a bylo možné mezi sebou porovnat dynamické účinky na jednotlivých konstrukcích, je výhodné vyhodnotit jej ve třech pomyslných rovinách. První je rovina časová, kde se budou hodnotit maximální a minimální hodnoty obsažené v měřeném signálu a především efektivní hodnota (často se užívá označení RMS, což je zkratka Root Mean Square). V časové oblasti se získá ze signálu informace, ve kterém časovém okamžiku se vykytují maxima a minima (na které nápravě, případně kole vlaku) a také je možné získat představu o celkovém energetickém působení vlaku na konstrukci (RMS, případně Creep faktor apod.). Pro podrobnou analýzu a rozbor dynamických účinků je to však informace nedostačující, neboť není známo frekvenční složení. Z tohoto důvodu je vhodné použití převodu signálu z roviny časové do roviny frekvenční. Tento převod lze provést pomocí metod založených převážně na Fourierově transformaci. Ve frekvenční rovině je možné provést rozbor, jaké frekvenční složky jsou v signálu nejvýraznější. Pro podrobný rozbor je vhodné použít ještě třetí rovinu vyhodnocení, a to rovinu časově-frekvenční. V této rovině je možné sledovat nejen frekvenční složení signálu, ale také výskyt frekvenčních složek v čase. V následující části je popsán použitý matematický aparát.

7.1. Časová oblast

Základním popisem signálu v časové oblasti je pomocí veličin, jež vibrace (mechanické chvění) charakterizují. Jsou jimi výchylka, rychlost a zrychlení. Rychlost kmitání můžeme popsat v porovnání s výchylkou jako fázový předstih o $\pi/2$ a zrychlení kmitání jako fázový předstih π (Obr. 7.1). Pokud chceme z výchylky dostat rychlost a zrychlení, pak vztahy mezi výchylkou, rychlostí a zrychlením, můžeme popsat následujícími vzorci:

$$u = A \cdot \sin \omega t \quad (7.1)$$

$$u = A \quad (7.2)$$

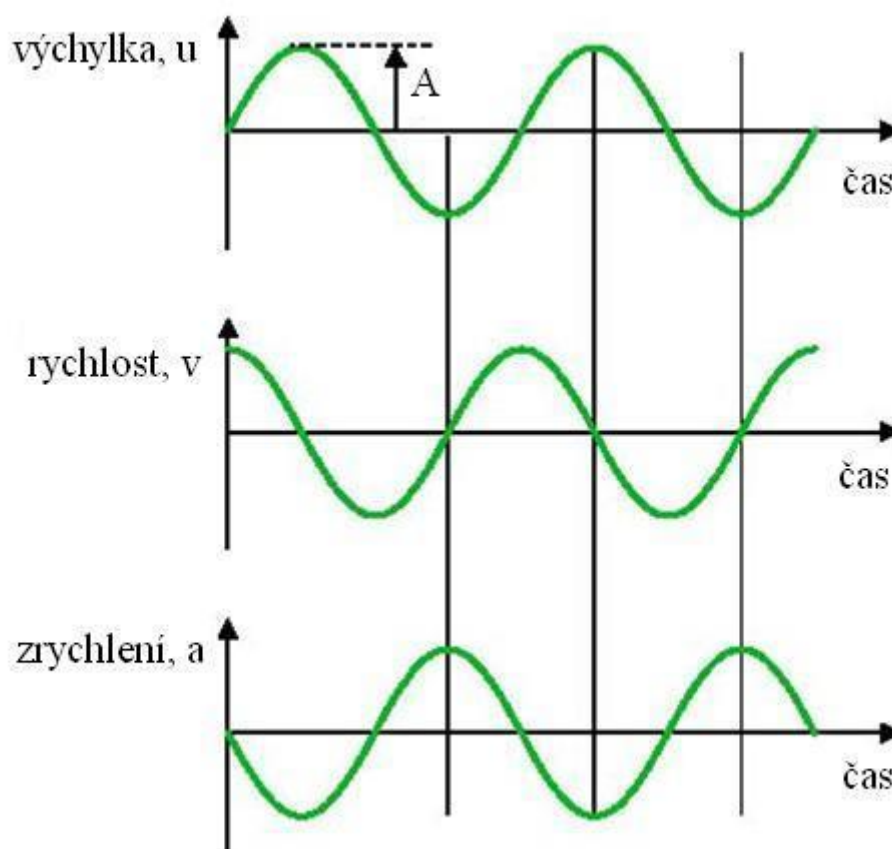
$$v = \frac{du}{dt} = A\omega \cos \omega t \quad (7.3)$$

$$v = A\omega = A2\pi f \quad (7.4)$$

$$a = \frac{d^2 u}{dt^2} = A\omega^2 \sin \omega t \quad (7.5)$$

$$a = A\omega^2 = A \cdot 4\pi^2 f^2 \quad (7.6)$$

Kde u je výchylka, v je rychlost, a je zrychlení, A je amplituda, ω je úhlová rychlost (úhlová frekvence) a t je čas. Z hlediska širokého frekvenčního složení měřeného signálu a zaměřením na přenos vibrací konstrukcí je nejvhodnější metodou měření a vyhodnocování zrychlení vibrací.



Obr. 7.1 Grafické znázornění závislosti výchylky na rychlosti a zrychlení [88]

Pro hodnocení časové signálu zrychlení vibrací jsem vybral, vzhledem k silně nestacionárnímu a stochastickému průběhu [77], hodnocení minim, maxim a efektivní hodnoty. Hodnocení minim a maxim nám může odhalit tzv. plochá kola, případně nápravu, nebo podvozek vozidla, který vykazuje oproti ostatním nestandardní chování. Také nám odhalí maximální špičkové hodnoty kolových sil, převedené a zachycené ve formě zrychlení vibrací.

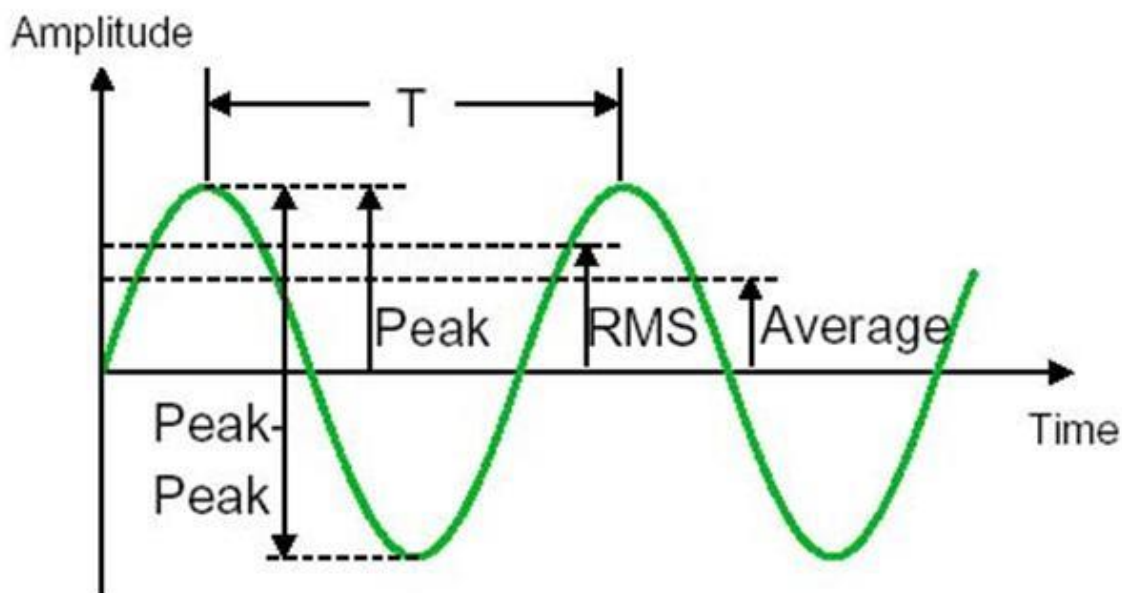
7.1.1. Efektivní hodnota zrychlení kmitání

Z hlediska hodnocení signálu jako celku je pak nejdůležitější hodnotou efektivní hodnota zrychlení vibrací. Hodnota RMS je z hlediska hodnocení vibrací v časové oblasti nejdůležitější parametr, protože zahrnuje dobu působení vibrací, a zároveň má přímý vztah k jeho energetickému obsahu. Je tedy měřítkem nebezpečnosti a škodlivosti vibrací. Efektivní hodnota zrychlení vibrací je definována dle vztahu [89].

$$a_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) \cdot dt}, \quad (7.7)$$

kde $a(t)$ je okamžitá hodnota zrychlení, T doba, pro kterou je třeba efektivní hodnotu určit.

Vztah mezi maximální / minimální amplitudou (peak) a hodnotou RMS je vidět na Obr. 7.2.



Obr. 7.2 Grafické znázornění vztahu mezi maximem / minimem a RMS [88]

Ve své práci jsem se rozhodl pro použití RMS jako klouzavé hodnoty a to ve formě plochy pod křivkou klouzavé RMS. Při výpočtu klasické RMS ve formě jedné hodnoty musíme přesně vymezit oblast působení vlaku na konstrukci (například pomocí spouštěcího zařízení). Pokud to neuděláme, tak nám bude hodnota RMS klesat s délkou záznamu před a za měřeným místem. Tedy pokud spustíme a ukončíme měření vždy v jiném bodě, tak i u teoreticky naprosto stejného záznamu bude hodnota RMS rozdílná. Signál lze upravit samozřejmě v průběhu vyhodnocení, ale ani to nám však problém zcela nevyřeší, protože s počtem vozů nám bude hodnota RMS také klesat, neboť mezi vozy vždy dojde k uklidnění. Nastane tak paradoxní situace, kdy vlak, který měl o několik vozů víc má nižší hodnotu RMS, přestože působil na konstrukci výhybky více vozy a tudíž i větší energií. Všechny tyto negativní aspekty můžeme odstranit tím, že

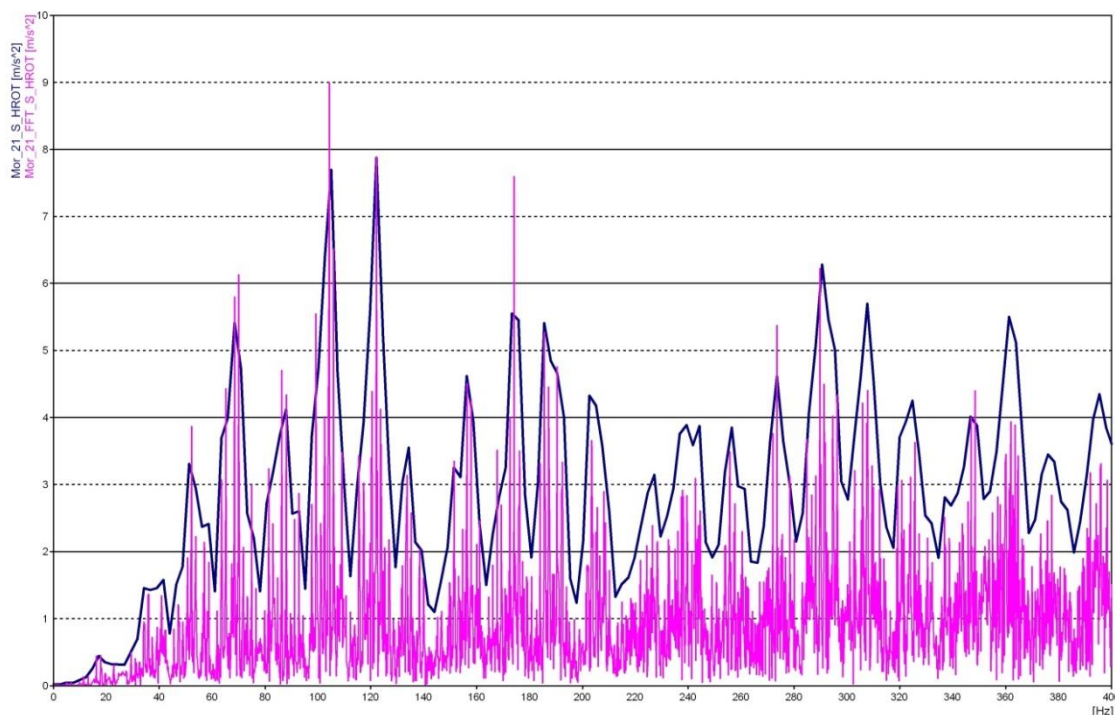
budeme používat plochu pod křivkou klouzavého RMS. Pro výpočet plochy klouzavé RMS jsem využil vzorec 7.7 s tím, že jsem vždy spočítal hodnotu po 200 vzorcích a posunul výpočet o jeden vzorek a znovu spočítal hodnotu RMS. Tím jsem dostal dostatečně přesnou křivku, pod kterou jsem poté spočítal plochu dle vzorce 7.8:

$$P = \int_a^b f(x) dx, \quad (7.8)$$

kde P je plocha pod křivkou klouzavého RMS, a a b jsou meze pro výpočet a $f(x)$ je křivka klouzavého RMS.

7.2. Frekvenční oblast

Pro převod do frekvenční roviny jsem se rozhodl využít Fourierovu transformaci. Výhodou Fourierovi transformace je, že se jedná o neparametrickou metodu, tedy že celá analýza se opírá pouze o změřená data. Získáme tak reálné frekvenční spektrum a na první hodnocení se jedná o velmi vhodnou metodu. Při hodnocení technických signálů se dnes používá tzv. rychlá Fourierova transformace (Fast Fourier Transform – zkratka FFT). Při porovnávání jednotlivých signálů v jednom grafu je však výhodnější přece jen provést určité zjednodušení a „zprůměrování“. Pro tuto aplikaci jsem vybral Welchovu metodu, která při velmi vhodném nastavení dokáže poměrně věrně vystihnout tvar frekvenčního spektra (Obr. 7.3).



Obr. 7.3 Porovnání FFT a Welchovi metody

7.2.1. Fourierova transformace

Jedná se o nejčastější transformaci pro převod z časové do frekvenční oblasti. Převod z časové do frekvenční oblasti znázorňuje závislost amplitudy kmitání na frekvenci kmitání. Fourierova transformace je definována pro spojitou funkci následujícími integrálními rovnicemi. Pro přímou transformaci platí vztah [90]:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-i2\pi f t} \cdot dt \quad (7.9)$$

kde f je frekvence, t je čas, $x(t)$ je signál v časové oblasti a $X(f)$ je jeho reprezentace ve frekvenční oblasti, i je imaginární jednotka.

7.2.2. Diskrétní Fourierova transformace – DFT

Pokud ovšem pracujeme s diskrétním (navzorkovaným) signálem, pak pro přímou Fourierovu transformaci platí vztah [90]:

$$X_k = \frac{1}{T} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{-i(\frac{2\pi k}{T}) \cdot (n\Delta)} \cdot \Delta = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{-i(\frac{2\pi k n}{N})} \quad (7.10)$$

kde x_n je hodnota n -tého prvku diskrétní posloupnosti (čas $t = n \cdot \Delta$), X_k je k -tá frekvenční složka signálu, $\Delta = \frac{T}{N}$, T je doba trvání realizace, N je počet prvků naměřené posloupnosti a i je imaginární jednotka.

7.2.3. Fast Fourier Transform – FFT

Pro výpočet DFT s N vzorky je třeba provést N^2 sčítání a N^2 násobení komplexních čísel. Cooley a Tukey vypracovali metodu značného urychlení výpočtu, pro kterou se používá název Fast Fourier Transform. Podstatou této metody je volba zvláštní délky záznamu:

$$N = 2^m, \quad (7.11)$$

kde m je přirozené číslo. Hodnotám $m = 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13$ odpovídá N :

$$N = 128, 256, 512, 1024, 2048, 4096, 8192, \quad (7.12)$$

vztah (7.10) se v praktických úlohách potom aplikuje pro tyto délky signálu N [77].

7.2.4. Welchova metoda

Welchova metoda je jistou modifikací algoritmu rychlé Fourierovi transformace. Digitalizovaný signál $x[n]$ ($n=0, 1, 2, \dots, N-1$) je rozdělen na K segmentů, každý o délce M vzorků ($x_i[m]$, $i=0, 1, \dots, k-1$, $m=0, 1, \dots, M-1$). Segmenty jsou umístěny buď těsně vedle sebe, pak $N=K \cdot M$, nebo se mohou překrývat. Každý segment je vážen příslušnou okénkovou funkcí $w[m]$. Po transformaci a následném výpočtu kvadrátu modulu

vzniknou dílčí periodogramy $S_j[k]$. Tyto vytvoří po zprůměrování výsledný vyhlazený odhad spektrální hustoty $S[k]$. Tento odhad lze popsat následujícími vztahy. Dílčí periodogram je určen vztahem [19].

$$S_j[k] = \frac{1}{U \cdot M} \cdot \left| \sum_{m=0}^{M-1} x[m + i \cdot M] \cdot w[m] \cdot e^{\left(\frac{-j2\pi mk}{M}\right)} \right|^2, \quad (7.13)$$

kde

$$U = \frac{1}{M} \cdot \sum_{m=0}^{M-1} w^2[m] \quad (7.14)$$

je norma vektoru okénkové funkce, $w[m]$ je okénková funkce. Výsledný vyhlazený odhad se získá zprůměrováním dílčích periodogramů:

$$\hat{S} = \frac{1}{K} \cdot \sum_{i=0}^{K-1} S_j[k]. \quad (7.15)$$

V aplikaci na měřený signál se mi osvědčila aplikace rektangulární (obdélníkové) okénkové funkce s délkou okénka 1024 vzorků a překrytí okénka 90 %.

7.2.5. Parsevalův teorém

Důležitým teorémem pro signálovou analýzu je Parsevalův teorém, který vyjadřuje, že energie signálu se transformací z časové do frekvenční oblasti nezmění. Pro spojitou oblast je dán Parsevalův teorém rovnicí [90]:

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 \cdot dt = \int_{-\infty}^{\infty} |X(f)|^2 \cdot df \quad (7.19)$$

Kde E představuje celkovou energii signálu $x(t)$ v časové oblasti a $X(f)$ ve frekvenční oblasti. Pro diskrétní Fourierovu transformaci pak platí vztah:

$$E = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x_n^2 = \sum_{k=0}^{N-1} X_k^* \cdot X_k \quad (7.20)$$

Kde $*$ značí komplexní konjugaci.

7.3. Časově-frekvenční oblast

Z frekvenční analýzy získáme informaci, jaké frekvence nám v signálu působí, ale nezjistíme, jejich časovou lokalizaci. Jinými slovy nebudeme schopni odhadnout, jestli dominantní frekvenční složky skutečně odpovídají průjezdu jednotlivých kol. Tyto informace můžeme zjistit z časově-frekvenční analýzy.

7.3.1. Krátkodobá (okénková) Fourierova transformace (STFT)

STFT (Short Time Fourier Transform) lokalizuje frekvenční složky v čase s konstantním (lineárním) rozlišením. Základním principem je rozdělení signálu na dostatečně malé realizace, u nichž je možno předpokládat dostatečnou stacionaritu. To je provedeno multiplikací jisté okénkové funkce na signálu. Na každém takovém výřezu je provedena Fourierova transformace. Okénko se posouvá v čase. STFT poskytuje kompromis mezi časovou a frekvenční reprezentací signálů [91]. Její definiční integrál je:

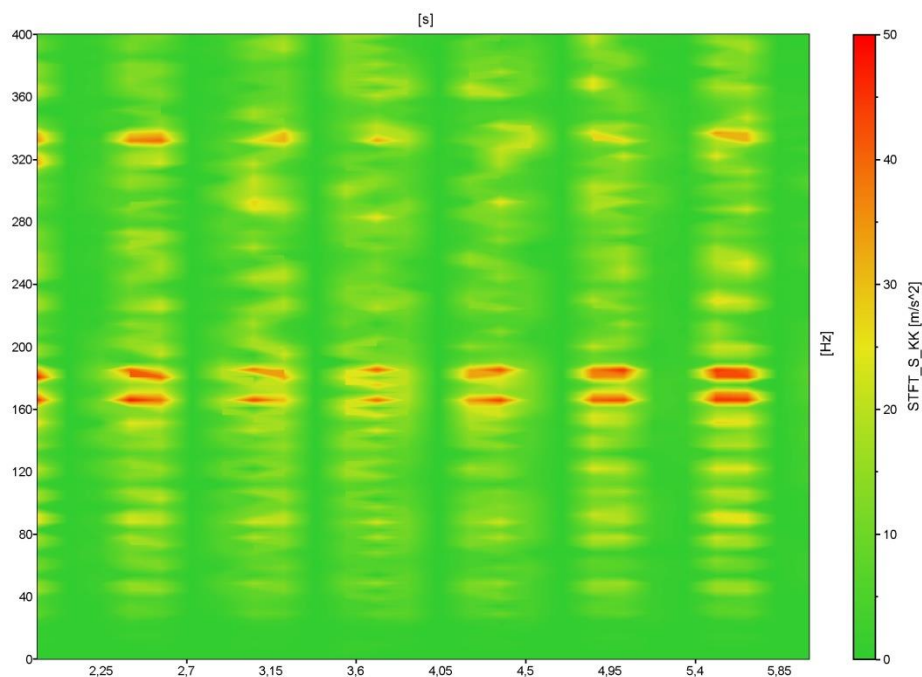
$$STFT_x^{(\omega)}(t', f) = \int_{-\infty}^{\infty} [x(t) \cdot g^*(t - t')] \cdot e^{-i2\pi f(t - t')} \cdot dt, \quad (7.21)$$

kde g je okénková funkce, $*$ komplexní konjunkce, t' časové posunutí okénka, $x(t)$ je časová reprezentace signálu a $STFT_x^{(\omega)}(t', f)$ je jeho časově-frekvenční reprezentace [91]. Pro zpracování navrhovaného diskrétního signálu, je nutno modifikovat výše uvedenou integrální rovnici (7.21) do tvaru sumačního:

$$STFT(m, k) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot g[n - m]^* \cdot e^{\frac{-i2\pi kn}{N}}, \quad (7.22)$$

kde $x[n]$ je datová posloupnost analyzovaného signálu, g okénková funkce, m posunutí okna, $*$ komplexní konjunkce, k frekvenční složka a N celkový počet vzorků signálu [90].

V aplikaci na měřený signál se mi osvědčila aplikace obdélníkové okénkové funkce s délkou okénka 1024 vzorků a překrytí okénka 90 %. V grafickém zobrazení jsem se rozhodl pro hustotní spektrogram, kde na ose x je čas, na ose y je frekvence a hodnoty na jednotlivých frekvencích jsou zobrazeny barevným odstínem (Obr. 7.7).



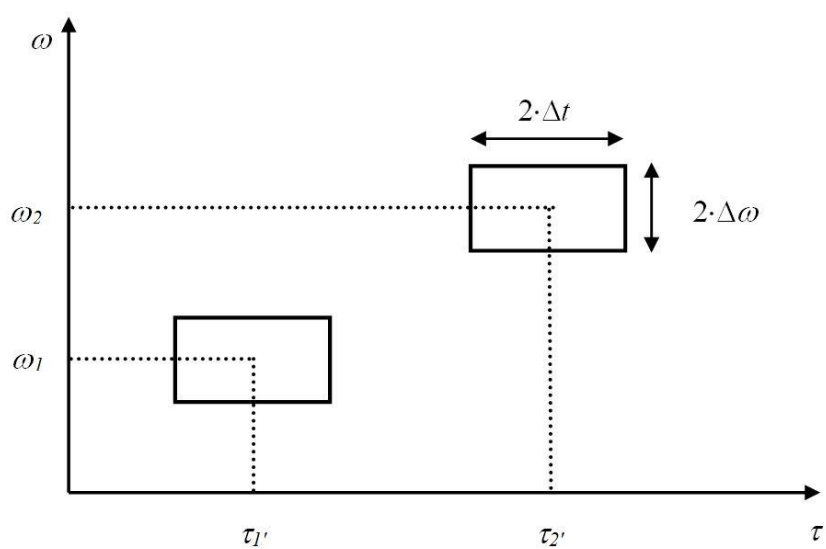
Obr. 7.7 Hustotní spektrogram STFT

7.3.2. Heisenbergův princip neurčitosti

Časově frekvenční zobrazení Krátkodobé Fourierovy transformace má určité omezení. Výsledné rozlišení v čase a frekvenci je limitováno tzv. Heisenbergovým principem neurčitosti [90, 91].

$$\Delta t \cdot \Delta \omega = \text{konst.} \quad (7.23)$$

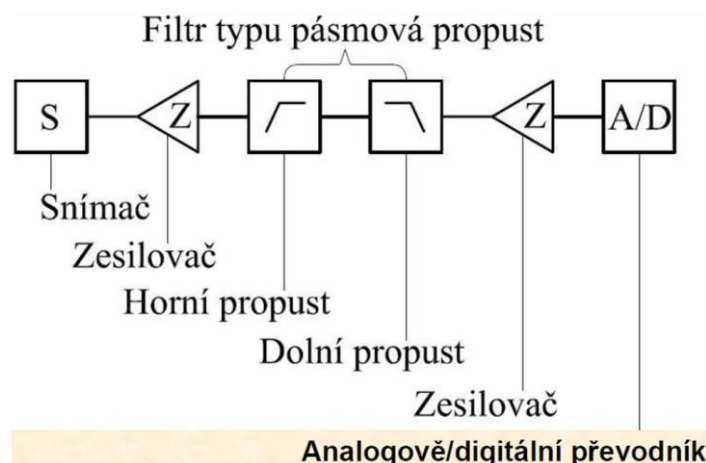
Rozlišení v časové i frekvenční oblasti nemůže být nekonečně malé a lze je vyjádřit výše uvedeným principem neurčitosti. Složka signálu nemůže být prezentována jako bod v časově frekvenčním prostoru. Je možné pouze určit její pozici uvnitř obdélníka $\Delta t \cdot \Delta \omega$ v dané časově frekvenční oblasti. Výsledek Krátkodobé Fourierovy transformace tedy závisí na výběru okénkové funkce a její šíři. Tato skutečnost je často graficky prezentována formou Heisenbergových obdélníků, jak je prezentováno na Obr. 7.8 [90, 91]. Čím širší bude okénko, tím lepší získáme frekvenční rozlišení a horší časové rozlišení. Je třeba vybrat šířku okénka tak, abychom měli dobré jak časové, tak frekvenční rozlišení. Jak již je uvedeno výše, používal jsem šířku okénka 1024 vzorků.



Obr. 7.8 *Pozice a tvar časově frekvenčních oken dle Heisenbergova principu neurčitosti [91]*

8. Parametry měření

Ke zpracování měřených hodnot je velice výhodné použít elektrických signálů, neboť u nich lze dosáhnout velké citlivosti, přesnosti, rychlosti měření, dálkového přenosu apod. Proto je vhodné při měření technických neelektrických veličin (jako jsou vibrace, ale i pohyby), převádět tyto veličiny na elektrické. [77]. Další výhodou je také to, že u elektrických analogových signálů lze velmi snadno provést převod na signál digitální a měřená data tak uchovávat. Jistou nevýhodou je nemožnost měřit signál spojitě, ale v diskrétních (časově zvolených okamžicích). Pro měření a ukládání signálu je třeba vytvořit měřicí řetězec, velmi zjednodušeně je znázorněn na Obr. 8.1. Převod spojitého (analogového) signálu na diskrétní (digitální) sestává ze dvou fází a těmi jsou vzorkování a kvantování. Níže budou postupně popsány všechny klíčové parametry měření, kromě snímačů, které již byly předmětem kapitoly 6. Je třeba podotknout, že parametry nastavení měřicího řetězce jsou rovněž součástí metodiky měření, bez jejich správného nastavení nebudou změřená data odpovídat skutečnému ději na konstrukci.



Obr. 8.1 Zjednodušený měřicí řetězec

8.1. Vzorkování signálu – vzorkovací frekvence

Vzorkováním (diskretizací) signálu měníme spojitý signál na posloupnost diskrétních číselných hodnot, každá hodnota je výsledkem digitalizace signálu v určeném časovém okamžiku. Většinou se používá periodického vzorkování, takže časový interval mezi dvěma po sobě jdoucími vzorky je konstantní. Periodou vzorkování je tak časový okamžik Δt a z něho vyplývá vzorkovací frekvence f_{vz} .

$$f_{vz} = \frac{1}{\Delta t} [\text{Hz}] \quad (8.1)$$

Vzorkovací frekvence musí být v určitém poměru k maximální frekvenci f_{max} obsažené v signálu. Je to proto, že při volbě periody vzorkování je třeba splnit tzv. Shannon – Kotělnikovův vzorkovací teorém, jinak by nebylo možné z měřených hodnot zpětně

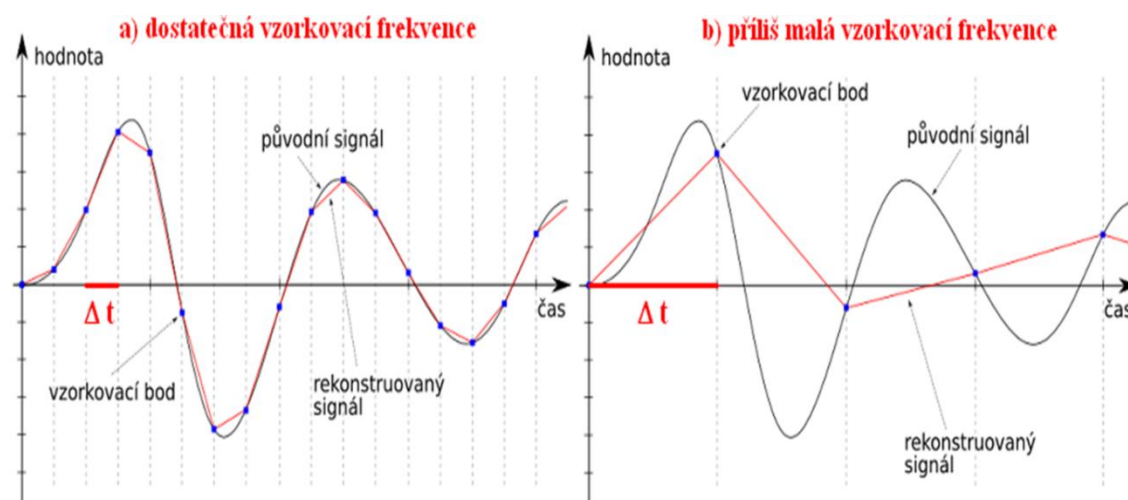
rekonstruovat původní spojité průběhy. Tento teorém říká, že vzorkovací frekvence musí být alespoň dvakrát větší než, maximální frekvence $f_{\max}$ obsažená v měřeném signálu.

$$f_{\text{vz}} \geq 2 \cdot f_{\max} \quad (8.2)$$

Vzorkovací frekvence $f_{\text{vz}}/2$ se nazývá Nyquistova frekvence. Vzorkování signálu Nyquistovou frekvencí větší než je maximální frekvence obsažená v signálu zajistí, že nenastane tzv. aliasing efekt [91], [77]. Pro Nyquistovu frekvenci tedy platí:

$$f_{\text{Nyq}} \approx \frac{f_{\text{vz}}}{2} \quad (8.3)$$

Aliasing efekt způsobí, že navzorkovaný signál nebude odpovídat skutečnému signálu (Obr. 8.2), proto je třeba mít dostatečně velkou vzorkovací frekvenci, abychom měli co nejreálněji zobrazený skutečný průběh signálu. Ve své práci jsem se rozhodl pro sledování frekvencí do 1 000 Hz, neboť mě zajímají především jevy dynamické a už méně dynamicko-akustické a akustické. Vzorkovací frekvence byla proto zvolena na 10 kHz, což je již velmi dobrá přesnost pro maximální frekvenci 1 kHz. Doporučená je minimálně 2,5 násobek maximální měřené frekvence (v našem případě tedy 2,5 kHz).



Obr. 8.2 Rekonstrukce signálu při dostatečné vzorkovací frekvenci (odpovídá původnímu signálu) a při nedostatečné vzorkovací frekvenci (rekonstruovaný signál neodpovídá původnímu)[92]

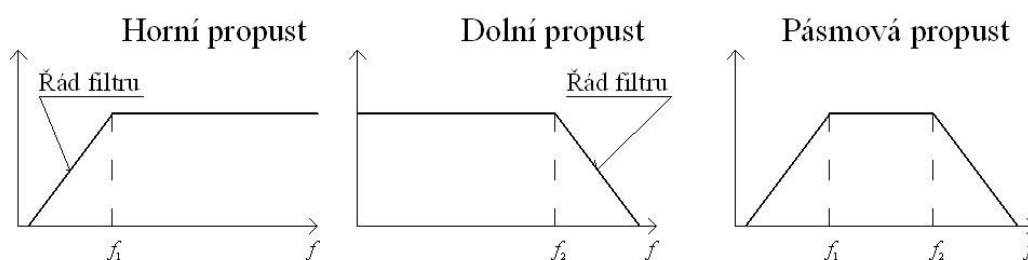
8.2. Kvantování signálu – A/D převodník

Kvantování signálu závisí na rozlišovací schopnosti A/D převodníku. Jednotka kvantování určuje zároveň maximální rozlišovací schopnost daného převodníku. Pro chybu kvantování je určující počet kvantizačních úrovní n . Jelikož se digitální signál povětšinou zpracovává na zařízeních pracujících ve dvojkové číselné soustavě, bývají počty kvantizačních úrovní A/D převodníků zpravidla rovny mocnině 2^n , přičemž

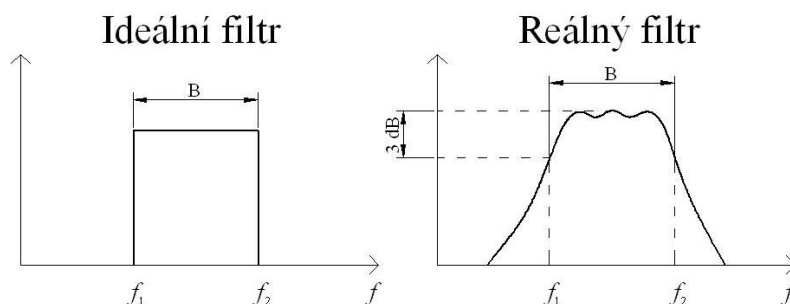
rozlišení nakvantovaného signálu pak lze vyjádřit v n bitech. V dnes používaných měřicích ústřednách jsou již 24-bitové A/D převodníky, proto chybu z kvantování nemá smysl řešit, protože je často menší, než rozlišovací schopnost snímačů. Lidově řečeno je 24-bitový A/D převodník teoreticky schopný rozdělit diskretní signál na 16 777 216 hodnot, což třeba při měřicím rozsahu snímače $0 - 7\,000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ znamená teoretickou přesnost $0,000417232 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

8.3. Filtry

Filtr při měření používáme k oříznutí (potlačení) velmi nízkých frekvencí (horní propust Obr. 8.3), nebo k oříznutí vysokých frekvencí (dolní propust Obr. 8.3). Pokud použijeme oba filtry zároveň, pak se takové sestavě říká pásmová propust (Obr. 8.3). Použití pásmové propusti je velmi výhodné, protože čím užší šířka pásma, tím detailnější informaci o signálu dostaneme. V případě našich měření je filtr typu pásmová propust nastaven následovně. Na kolejnici a pražci mě nebudou zajímat velmi nízké frekvence do 3 Hz, které nám signál při další zpracování znehodnocují ani příliš vysoké frekvence nad 1000 Hz, které se projevují především dynamicko-akusticky a z hlediska dynamiky nás nezajímají. Ve šterkovém loži bude filtr dolní propusti také nastaven na 1 000 Hz, ale filtr horní propusti na 0,3 Hz. Sklon filtru (Obr. 8.3) nám udává tzv. řád filtru, čím vyšší je řád filtru, tím je filtr tvrdší, tzn., že tím méně frekvencí pod nebo nad filtr propustí. Ideální filtr (Obr. 8.4) neexistuje a tak se u reálných filtrů definuje jejich rozsah B , v případě pásmové propusti tak, že se sníží hladina o 3 dB a dostaneme tak skutečnou šířku pásmové propusti (Obr. 8.4).



Obr. 8.3 Horní filtr, dolní filtr, pásmová propust, řád filtru.



Obr. 8.4 Ideální filtr a skutečný filtr

9. Úvod k provedeným měřením

Další kapitoly disertační práce jsou věnovány jednotlivým měřením ve vybraných lokalitách. U každého měření je v úvodu uvedeno, za jakým účelem bylo měření naplánováno a zrealizováno. Poté vždy následuje část, kde se věnuji popisu lokality měření a měřených výhybek. Je zde zdůvodněn výběr měřených konstrukcí, a co mne k němu vedlo. Všechna měření jsou provedena jako srovnávací, tedy vždy bylo třeba k vybrané výhybce zvolit vhodnou srovnávací konstrukci stejných parametrů (štíhlost konstrukce, rychlost projíždějících vlaků, skladba dopravy, apod.) Ne vždy bylo možné všechny aspekty zohlednit a někdy bylo třeba přistoupit ke kompromisu. Jedná se o měření v podmínkách plného provozu a to sebou neslo také určitá úskalí a omezení, se kterými jsem se musel vyrovnat. U každého měření je uvedena metodika měření a parametry měření. Vyhodnocení měření je vždy provedeno v třech pomyslných rovinách, časové, frekvenční a časově-frekvenční. Ke každému měření je vyhotovena přílohová část, kde lze najít vybrané grafy, tabulky a fotodokumentaci z měření. Nechtěl jsem do disertační práce uvádět všechny vyhodnocené grafy, protože by přílohová část byla velmi rozsáhlá, pokusil jsem se vybrat reprezentativní část.

Chtěl bych na tomto místě ještě jednou poděkovat všem, kteří se na organizaci a realizaci měření podíleli. Provedená experimentální měření nebylo lehké realizovat a bez podpory mých kolegů bych nebyl schopen měření zrealizovat vůbec. Chtěl bych poděkovat především vedoucímu práce prof. Jaroslavu Smutnému, Ph.D., který mě podporoval a významně pomáhal při organizaci a realizaci měření a pak také prof. Luboši Pazderovi, CSc., který se velmi výrazně podílel na všech měřeních. Dalšími pomocníky, bez nichž bych nedokázal měření realizovat, byli moji kolegové z Ústavu železničních konstrukcí a staveb Ing. Jan Valehrach, Ing. Petr Guziur, Ing. Jaroslav Bílek, Ing. Miroslava Hruzíková, Ph.D., Ing. Richard Svoboda, Ph.D., doc. Ing. Otto Plášek, Ph.D., Ing. Vladimír Tomandl, Zdeněk Meluzín, Karel Matoušek a Ing. Michal Volštát. Rád bych také poděkoval studentům a nyní již vlastně mým kolegům Bc. Daniele Sadlekové, Ing. Janu Hajnišovi, Ing. Anetě Francové a Ing. Adamu Podolníkově.

Měření proběhla za podpory projektu Zvýšení kvality jízdní dráhy ve výhybkách pomocí zpružnění, kód projektu TA01031297, podporovaný Technologickou agenturou České republiky. Za podporu z tohoto projektu bych také rád poděkoval.

U všech měření byla použita měřicí ústředna DEWE 2502. Záznamy byly ukládány na pevném disku přímo v ústředně. Rychlosti všech drážních vozidel v místě přejezdu přes experimentální stanoviště byly měřeny radarovým zařízením Buschnell 10-1900. K práci s naměřenými signály byl použit software měřicí ústředny DeweSoft, dále program FlexPro 7.0 a v rámci projektu popsáného výše vytvořený software VibroDiagRail. Pro “průhybové“ křivky pražců a pro tabulky byl využit program Excel.

10. Měření v žst. Poříčany

Měření v železniční stanici Poříčany bylo naplánováno a zrealizováno především pro stanovení vlivu tuhosti v uzlu upevnění v srdcovkové části výhybky na dynamické účinky. Vybraná výhybka č. 10 má vulkanizované podložky (systém upevnění ERL je popsán v kapitole 5.3). Výhybka má také dělené dlouhé výhybkové pražce, které by měli zabránit nežádoucímu převýšení v případech jednostranného pojezdu výhybky (Obr. 10.1).

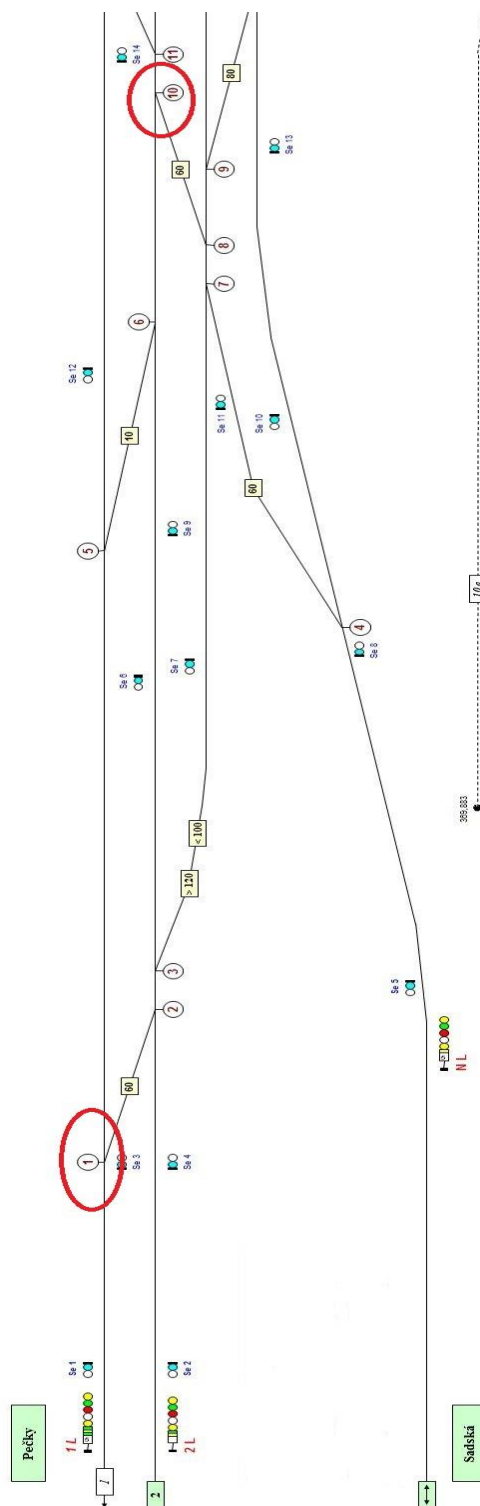


Obr. 10.1 Pohled na výhybku č. 10 v žst. Poříčany

10.1. Popis lokality měření a měřených výhybek

K výhybce č. 10 bylo problematické najít vhodnou srovnávací výhybku, která bude mít stejnou štíhlost (úhel odbočení) a bude ležet pokud možno na stejném zhlaví. Na opačném zhlaví jsou již výhybky na dřevěných pražcích a také tam stanice přechází z násypu do zářezu. Je zde tak celkově jiná tuhost uložení. Cílem bylo výhybku s vulkanizovanými podložkami srovnat s nejčastěji používanou konstrukcí výhybky (na betonových pražcích s upevněním KS). Proto byla nakonec vybrána výhybka č. 1 (Obr. 10.3) na stejném pečském zhlaví (směrem na Brno – Obr 10.2). Výhybka č. 1 má stejnou štíhlost (1:12 – 500), jedná se o výhybku, která je většinou vlaků poježděna rovněž po hrotu, stejně jako výhybka č. 10. Výhybka č. 1 má klasické upevnění pomocí žebrových podkladnic na betonových pražcích se svěrkami Skl 24, tedy upevnění, které je dnes nejvíce používáno pro výhybky v hlavních kolejích. U výhybek se bohužel nepodařilo zajistit stejnou skladbu vlaků, protože výhybka č. 10 je v banalizované koleji č. 0 a je používána především rychlými vlaky z obou směrů (převládající je směr Praha). Vlaky pomalejší a osobní zastavující v žst. Poříčany jedou po koleji č. 2, tedy do odbočného směru ve výhybce č. 3. Výhybka č. 1 je v koleji č. 1 a je poježděna výhradně po hrotu a to všemi typy vlaků. Také stav z hlediska údržby byl na obou výhybkách jiný. Zatímco výhybka č. 10 byla vložena v roce 1995 jako součást dvou zkušebních výhybek tvaru J60-1:12-500 německého výrobce WBG Brandenburg GmbH a od té doby na výhybce probíhala jen základní údržba. Tak výhybka č. 1 byla vložena v roce

2007 a srdcovka byla dle informací od traťmistra měněna půl roku před měřením, takže z hlediska ojetí jsou konstrukce rovněž rozdílné. I přes všechna tato omezení byla výhybka č. 1 nejvhodnější variantou na srovnání.



Obr. 10.2 Schéma části zhlaví žst. Poříčany, měřené výhybky jsou označeny červenou elipsou [93]

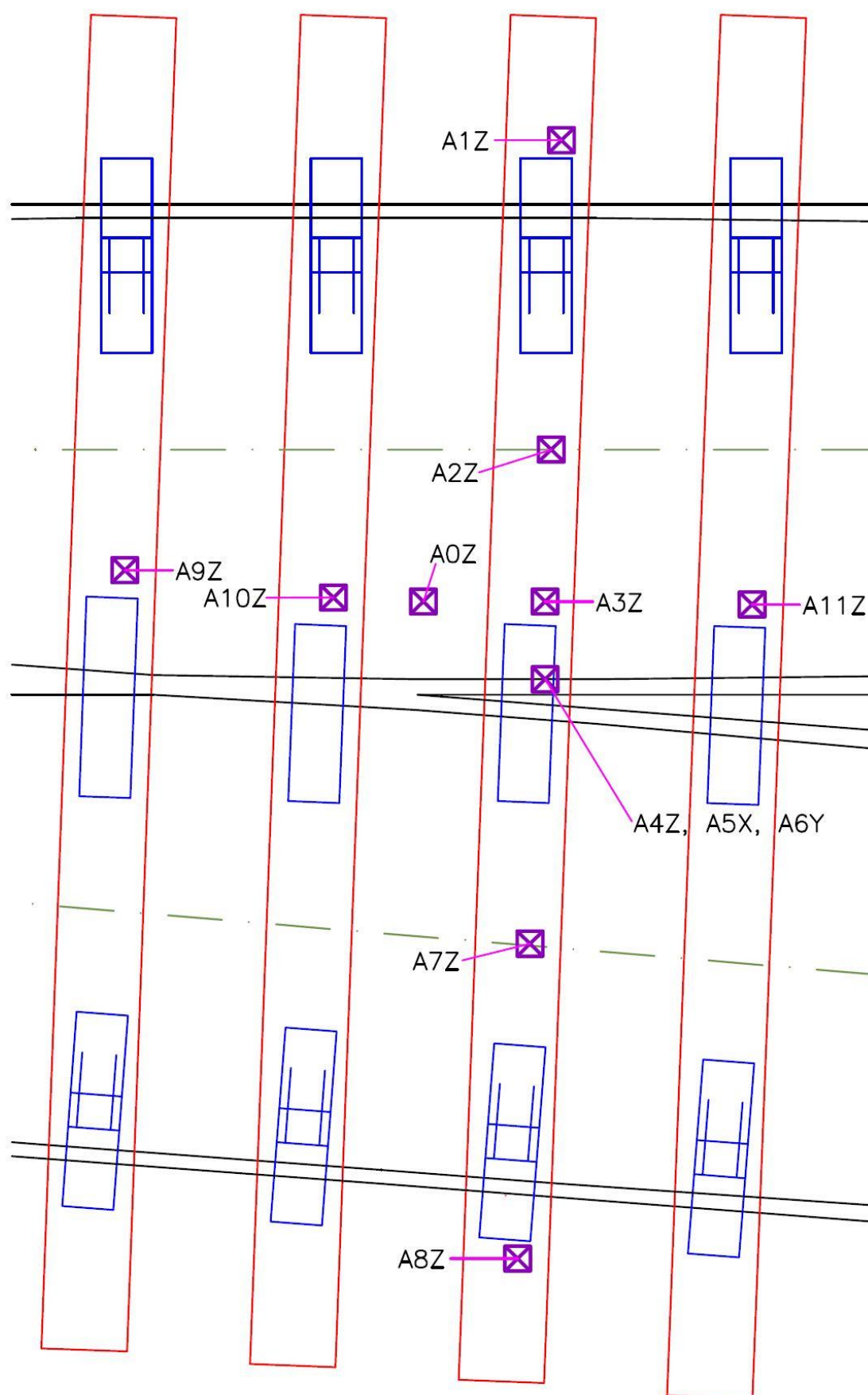


Obr. 10.3 Pohled na výchybku č. 1 v žst. Poříčany

10.2. Metodika a parametry měření

Metodika měření musela být především kvůli poloze výchybky č. 10 v banalizované koleji upravena. Jednalo se o moje rozhodnutí. Přístup do výchybky č. 10 je možný jen přes kolej č. 1 a směrem na Prahu není dostatečný výhled pro vyklizení koleje. Proto jsem nerealizoval část metodiky, která se zabývá pohybovým chováním konstrukce. Aplikace přípravků pro upevnění čidel v tomto místě by bylo problematické a bezpečnost moje a mých kolegů byla prvořadá. Metodika měření zrychlení vibrací byla posílena a byly rozmístěny navíc čidla na pražce k srdcovce výchybky před a za místo přechodu kola z hrotu srdcovky na křídlovou kolejnici. Použitá metodika měření je na *Obr. 10.4*. Parametry měření zůstaly stejné, jak jsou popsány v kapitole 8, tedy:

- Vzorkovací frekvence: 10kHz
- Dolní propust: 1kHz
- Horní propust: 3Hz (ve šterku 0,3Hz)
- Počet měřených kanálů: 12 (vibrace)
- Počet měřicích dnů: 2 (8. 7. 2013 – výchybka č. 10)
(9. 7. 2013 – výchybka č. 1)
- Počet změřených vlaků: 22 (výchybka č. 10 i 1)



Obr. 10.4 Použitá metodika měření v žst. Poříčany

10.3. Vyhodnocení měření v žst. Poříčany

Vyhodnocení měření je rozděleno do tří částí. Nejprve se budu věnovat vyhodnocení v časové oblasti, byly hodnoceny především maxima, minima a plocha pod křivkou klouzavé RMS. Ve frekvenční oblasti jsem využil pro srovnání dynamického chování výhybek Welchovu metodu, která vhodným průměrováním dokáže lépe zobrazit několik křivek v jednom grafu. V časově-frekvenční oblasti jsem se rozhodl pro prezentaci formou hustotních spektrogramů, kde je hodnota zrychlení na jednotlivých frekvencích zobrazeno barevným odstínem. Jako u jiných měření jsem se rozhodl do disertační práce uvést pouze zlomek spočítaných grafů a to především z toho důvodu, aby přílohy k práci nebyly příliš rozsáhlé. Věřím, že i tak je vybraná část dostatečně reprezentativní. Tabulky změřených vlaků jsou součástí přílohy k měření v Poříčanech.

10.4. Vyhodnocení v časové oblasti

V časové oblasti jsem si nejprve ke všem snímačům zobrazil jejich časový průběh, což je vidět na vybraných vlcích v příloze k měření v Poříčanech. Jde o přílohu kde je zobrazen časový průběh zrychlení kmitání a z něj vypočítané frekvenční spektrum pomocí FFT vedle sebe. Obrázky jsou uspořádány tak, že vlevo je vždy graf zrychlení a vpravo je FFT. Grafy jsou také uspořádány do tří skupin. V každé budu sledovat trochu jiný přenos vibrací konstrukcí. První je roznos vibrací pražcem pod hrotem srdcovky, druhou je roznos vibrací po délce srdcovky výhybky a třetí je přechod vibrací z křídlové kolejnice do šterkového lože. Už z těchto grafů lze přibližně stanovit hodnoty minim a maxim a porovnat průběhy na jednotlivých vlcích. Z tohoto prvního porovnání je znát, že špičkové hodnoty zrychlení vibrací jsou na výhybce č. 10 vyšší a to především na křídlové kolejnici ve svislém směru. Pro lepší srovnání jsem udělal tabulky minim a maxim pro každý vlak, jsou součástí přílohy k měření v Poříčanech. Tabulky jsou opět rozděleny do tří skupin (roznos pražcem, po délce srdcovky a přechod z křídlové kolejnice do šterkového lože). V těchto tabulkách jsou výrazné frekvenční špičky označeny červenou barvou. V tabulkách je vidět, že především u výhybky č. 10 na křídlové kolejnici ve svislém a podélném směru je těchto špiček velmi mnoho. Je to zřejmě příznak horší geometrie přechodu na výhybce č. 10. Pro prezentaci v textové části disertační práce jsem z tabulek vybral hodnoty maximální, minimální a kvantily a dal je do přehledných tabulek.

10.4.1. Vyhodnocení v časové oblasti – pražec pod srdcovkou

Nejprve se budu věnovat šíření vibrací pražcem, poté podél srdcovky výhybky a nakonec přechodem vibrací z křídlové kolejnice do šterkového lože. V *Tab. 10.1* je vidět porovnání výhybek č. 1 a 10 z hlediska maximálních hodnot zrychlení kmitání pro pražec pod srdcovkou. Za hlavou pražce v přímé pojížděné větvi výhybky (snímač A1Z) jsou hodnoty zrychlení kmitání téměř dvojnásobné na výhybce č. 10, což je trochu překvapující. Je to pravděpodobně celkovým lepším stavem podepření pražce za jeho

hlavou u výhybky č. 1. V ose přímé koleje (snímač A2Z) jsou hodnoty již jen o něco vyšší na výhybce č. 10. Na výhybce č. 10 tak dochází k vyššímu útlumu špiček zrychlení vibrací. U srdcovky výhybky (snímač A3Z) jsou již obě konstrukce porovnatelné, což značí výhodnější tlumící schopnosti pro špičkové hodnoty u výhybky č. 10. V ose odbočné větve (snímač A7Z) je na tom podstatně lépe výhybka č. 1, v tomto místě má výhybka č. 10 5 x vyšší hodnoty. Tuto skutečnost přičítám tomu, že ve výhybce č. 10 jsou dělené pražce a snímač v ose koleje je tak u této výhybky na konci pražce, který kmitá výrazně rychleji a podepření v tomto místě je špatné, protože se podbývá pouze oblast za hlavami pražců a pod srdcovkou. Naopak za hlavou pražce v odbočné větvi (snímač A8Z) se ukazuje výhoda dělených pražců, kdy do tohoto místa jsou na výhybce č. 10 přeneseny jen minimální hodnoty a celkově jsou špičkové hodnoty v tomto místě až 10 x menší, jak na výhybce č. 1.

Maximální hodnoty zrychlení vibrací [m.s ⁻²]										
Snímač	A1Z		A2Z		A3Z		A7Z		A8Z	
Výhybka	1	10	1	10	1	10	1	10	1	10
maximum	159	286	145	181	164	177	233	767	250	24
kvantil 75	79	122	125	143	141	144	131	658	150	18
medián	59	111	111	121	131	130	104	561	134	15
kvantil 25	54	99	100	111	111	115	94	465	128	12
minimum	42	70	76	35	90	39	62	82	104	2

Tab. 10.1 Maximální hodnoty zrychlení vibrací na pražci pod srdcovkou

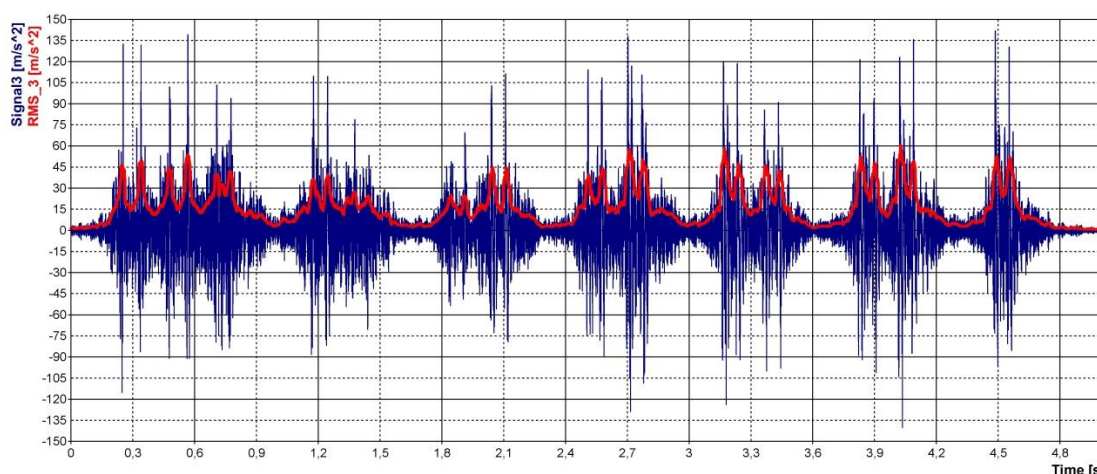
Z hlediska minimálních hodnot je situace velmi podobná, jako u hodnot maximálních (Tab. 10.2). Za hlavou pražce v přímé pojezdové větvi výhybky (snímač A1Z) jsou hodnoty zrychlení kmitání na výhybce č. 10 asi o třetinu vyšší. V ose přímé koleje (snímač A2Z) jsou hodnoty již jen o něco vyšší na výhybce č. 10. Na pražci pod srdcovkou (snímač A3Z) jsou hodnoty téměř porovnatelné, mírně vyšší na výhybce č. 10. Ve středu pražce (snímač A7Z) jsou hodnoty opět vyšší na výhybce č. 10, což je dáno konstrukcí pražce a výrazně nižší jsou za hlavou pražce v odbočné větvi (snímač A8Z).

Minimální hodnoty zrychlení vibrací [m.s ⁻²]										
Snímač	A1Z		A2Z		A3Z		A7Z		A8Z	
Výhybka	1	10	1	10	1	10	1	10	1	10
maximum	-50	-43	-75	-10	-74	-40	-70	-84	-69	-2
kvantil 75	-61	-108	-85	-95	-91	-99	-85	-123	-81	-9
medián	-77	-120	-95	-105	-101	-109	-95	-130	-85	-10
kvantil 25	-94	-128	-102	-113	-113	-122	-104	-145	-103	-12
minimum	-170	-160	-154	-169	-197	-135	-149	-256	-135	-15

Tab. 10.2 Minimální hodnoty zrychlení vibrací na pražci pod srdcovkou

Vyšší hodnoty špiček jsou zaznamenány na výhybce č. 10, což může být vlivem údržby, kde má výhodu výhybka č. 1, která má novou srdcovku. Výrazné rozdíly u špičkových hodnot zrychlení kmitání jsou jednak ve středu pražce v odbočné větvi a za hlavou pražce. Zde je vidět výhoda konstrukce výhybky č. 10, kdy je šíření vibrací do hlavy pražce v odbočné větvi značně omezeno a je tedy i předpoklad, že zde pražec nebude nežádoucím způsobem nadzvedáván, jako se tomu děje u některých jednostranně pojížděných výhybek klasické konstrukce. Jistou nevýhodou je vyšší zrychlení vibrací v ose odbočné větve u výhybky č. 10, je však otázka, zda to v tomto místě vadí, protože pražec by měl být podepřen především pod srdcovkou a v místě kolejnic.

Kromě maximální a minimální hodnot je vhodné se zajímat o celkovou energii, která je přenášena pražcem. Proto jsem na každém vlaku počítal klouzavou RMS (*Obr. 10.5*). Pod touto křivkou jsem poté spočítal plochu a vynesl hodnoty do tabulek, které jsou v příloze měření v Poříčanech. Do textové části jsem opět vybral z těchto tabulek hodnoty maximální, minimální a kvantily. Pro pražec pod srdcovkou je srovnání vidět v *Tab. 10.3*.



Obr. 10.5 Původní signál zrychlení vibrací (modře) a z něj vypočítaná klouzavá RMS (červeně)

Na hodnotách ploch pod křivkou RMS se částečně potvrdilo to, co bylo už vidět na hodnocení maxim a minim. Na výhybce č. 1 se vibrační energie šíří pražcem téměř rovnoměrně, největší hodnoty jsou u srdcovky výhybky a nejmenší na hlavách pražců. U výhybky č. 10 je to díky konstrukci pražce trochu jinak. Největší hodnoty jsou na konci děleného pražce v ose odbočné koleje a nejmenší na hlavě pražce v odbočné větvi, kam se vibrační energie téměř nepřenáší. Z analýzy je vidět, že vibrační energie, která je přenesena do pražce se jím poté šíří rovnoměrně. V ose koleje je pražec u výhybky č. 10 zřejmě špatně podepřen, proto je zde hodnota plochy pod křivkou RMS výrazně vyšší.

RMS hodnoty vibrací [m.s^{-1}]										
Snímač	A1Z		A2Z		A3Z		A7Z		A8Z	
Výhybka	1	10	1	10	1	10	1	10	1	10
maximum	238	105	285	111	272	125	272	225	233	10
kvantil 75	62	79	71	84	72	88	69	157	60	6
medián	52	66	61	69	64	71	62	109	51	5
kvantil 25	38	47	49	58	56	55	48	94	44	4
minimum	11	26	10	23	13	25	10	40	12	2

Tab. 10.3 Plocha pod křivkou RMS na pražci pod srdcovkou

10.4.2. Vyhodnocení v časové oblasti – pražce po délce srdcovky

Stejně tabulky, jako pro pražec pod srdcovkou jsou vyhotoveny i pro snímače na pražcích po délce srdcovky. V Tab. 10.4 jsou maximální hodnoty zrychlení kmitání.

Maximální hodnoty zrychlení vibrací [m.s^{-2}]								
Snímač	A9Z		A10Z		A3Z		A11Z	
Výhybka	1	10	1	10	1	10	1	10
maximum	87	57	138	36	164	177	222	192
kvantil 75	70	39	104	26	141	144	138	126
medián	63	33	97	20	131	130	127	106
kvantil 25	52	26	80	17	111	115	118	86
minimum	43	8	52	6	90	39	72	32

Tab. 10.4 Maxima na pražcích po délce srdcovky

Nejvyšší hodnoty jsou u obou výhybek na snímačích A3Z a A11Z. Z toho je vidět, že kola přecházela z hrotu srdcovky na křídlovou kolejnici někde mezi těmito snímači. Přece jen vyšší hodnoty jsou u obou výhybek na snímači A3Z, takže zde byla metodika zvolena dobře, neboť umožňuje sledování nejvíce zatíženého pražce. Dále se však obě konstrukce chovají rozdílně, zatímco u výhybky č. 10 dojde k výraznému útlumu na snímačích A9Z a A10Z, tak na výhybce č. 1 je útlum mnohem menší. Rozdíl na snímači A10Z je téměř 4 násobný v neprospěch výhybky č. 1.

Minimální hodnoty zrychlení vibrací [m.s^{-2}]								
Snímač	A9Z		A10Z		A3Z		A11Z	
Výhybka	1	10	1	10	1	10	1	10
maximum	-32	-11	-52	-12	-74	-40	-79	-19
kvantil 75	-53	-28	-107	-31	-91	-99	-103	-60
medián	-61	-41	-123	-33	-101	-109	-113	-65
kvantil 25	-70	-46	-140	-39	-113	-122	-131	-75
minimum	-96	-65	-196	-59	-197	-135	-171	-252

Tab. 10.5 Minima na pražcích po délce srdcovky

Velmi podobná situace jako u maxim je i u minim (Tab. 10.5) jen s tím rozdílem, že na snímači A11Z jsou u výhybky č. 1 hodnoty téměř dvojnásobné než u výhybky č. 10. Celkově lze říci, že z hlediska útlumu špičkových hodnot se chová výhybka č. 10 výrazně lépe, než výhybka č. 1.

RMS hodnoty vibrací [m.s^{-1}]								
Snímač	A9Z		A10Z		A3Z		A11Z	
Výhybka	1	10	1	10	1	10	1	10
maximum	205	26	256	24	272	125	324	58
kvantil 75	53	21	73	17	72	88	89	41
medián	37	19	57	15	64	71	72	38
kvantil 25	29	14	44	12	56	55	58	28
minimum	7	5	10	5	13	25	13	10

Tab. 10.6 Plocha pod křivkou RMS na pražcích po délce srdcovky

Z hlediska plochy pod křivkou RMS (Tab. 10.6) se potvrzuje, že vibrační energie se na výhybce č. 10 od snímače A3Z na obě strany výrazně snižuje, což lze připsat pozitivnímu působení uzlu upevnění. U výhybky č. 1 je snížení menší a snímač A11Z dokonce vykazuje stejné i mírně vyšší hodnoty, jako snímač A3Z. Je zřejmé, že dynamické zatížení se konstrukcí výhybky šíří do pražce mnohem lépe, než je tomu u výhybky č. 10.

10.4.3. Vyhodnocení v časové oblasti – přenos vibrací z křídlové kolejnice do šterkového lože

I pro přechod vibrací z křídlové kolejnice do kolejového lože jsem zvolil stejnou metodu vyhodnocení. V Tab. 10.7 jsou hodnoty maximálních hodnot zrychlení kmitání.

Maximální hodnoty zrychlení vibrací [m.s^{-2}]										
Snímač	A6Y		A5X		A4Z		A3Z		A0Z	
Výhybka	1	10	1	10	1	10	1	10	1	10
maximum	338	1218	167	621	2587	2945	164	177	66	90
kvantil 75	250	942	101	358	453	2784	141	144	56	69
medián	230	691	73	293	396	1259	131	130	43	60
kvantil 25	197	454	62	221	368	811	111	115	38	51
minimum	166	172	18	49	277	249	90	39	29	11

Tab. 10.7 Maxima na přechodu z křídlové kolejnice do šterkového lože

Maximální hodnoty na křídlové kolejnici jsou výrazně, více jak 3 x vyšší na výhybce č. 10 a to jak ve svislém (snímač A4Z), tak v příčném směru (snímač A6Y). V podélném směru je tento rozdíl ještě vyšší (snímač A5X). Tento fakt lze přisoudit tomu, že geometrie přechodu ve výhybce č. 1 je výrazně lepší. Při přechodu do pražce

se však rozdíl mezi výhybkami ztrácí (snímač A3Z). Ve šterkovém loži (snímač A0Z) je přece jen výraznější zatížení na výhybce č. 10, zdá se, že i přes výrazný útlum na pražci se některé špičkové hodnoty přenesly až do šterkového lože.

Minimální hodnoty zrychlení vibrací [m.s^{-2}]										
Snímač	A6Y		A5X		A4Z		A3Z		A0Z	
Výhybka	1	10	1	10	1	10	1	10	1	10
maximum	-119	-129	-45	-44	-303	-189	-74	-40	-30	-10
kvantil 75	-169	-416	-89	-219	-434	-558	-91	-99	-56	-49
medián	-192	-674	-115	-476	-448	-737	-101	-109	-60	-60
kvantil 25	-234	-858	-191	-951	-486	-1102	-113	-122	-71	-77
minimum	-418	-1038	-254	-1248	-688	-1872	-197	-135	-104	-89

Tab. 10.8 Minima na přechodu z křídlové kolejnice do šterkového lože

V Tab. 10.8 jsou zobrazena minima. Z hlediska minimálních hodnot je opět největší rozdíl na křídlové kolejnici, kde jsou ve svislém směru (snímač A4Z) téměř dvakrát vyšší hodnoty. V příčném směru na křídlové kolejnici (snímač A6Y) jsou pak více jak 3 x vyšší a v podélném směru až 5 x vyšší hodnoty. Opět se zde projevuje lepší geometrie přechodu na výhybce č. 1. Na pražci (snímač A3Z) a ve šterkovém loži (snímač A0Z) jsou však hodnoty minim téměř stejné.

Z pohledu maximálních a minimálních hodnot jsou výhybky na pražci a ve šterkovém loži srovnatelné, výrazný rozdíl je však na křídlové kolejnici, kde výhybka č. 10 dosahuje několika násobně vyšších hodnot. Uzel upevnění tedy je schopen tento rozdíl v podstatě smazat a jeví se velmi pozitivně. Porovnání ploch pod křivkou klouzavého RMS je v Tab. 10.9.

RMS hodnoty vibrací [m.s^{-1}]										
Snímač	A6Y		A5X		A4Z		A3Z		A0Z	
Výhybka	1	10	1	10	1	10	1	10	1	10
maximum	579	482	336	511	1374	680	272	125	43	22
kvantil 75	138	308	79	225	332	467	72	88	14	12
medián	103	238	48	155	235	316	64	71	11	10
kvantil 25	81	172	38	84	185	202	56	55	9	8
minimum	24	47	11	22	46	62	13	25	3	3

Tab. 10.9 Plocha pod křivkou RMS na přechodu z křídlové kolejnice do šterkového lože

Z hlediska celkové vibrační energie vyjádřené plochou pod křivkou klouzavého RMS (Tab. 10.9), se potvrzuje výrazně větší dynamické zatížení na křídlové kolejnici u výhybky č. 10. V příčném směru (snímač A6Y) jde o dvojnásobně vyšší hodnoty, v podélném směru (snímač A5X) více jak dvojnásobně vyšší hodnoty a ve svislém

směru (snímač A4Z) o třetinu vyšší hodnoty. Na pražci je již rozdíl mezi konstrukcemi malý a ve šterkovém loži jsou již obě konstrukce porovnatelné. Z hlediska RMS se zdá, že geometrie přechodu na výhybce č. 10 je sice v horším stavu, jako na výhybce č. 1, ale rozdíl není tak velký, jako u maxim a minim.

Je třeba podotknout, že na výhybce č. 10 jezdila poněkud odlišná skladba vlaků jako na výhybce č. 1, proto je porovnání zejména RMS problematické. Je však možné z celého časového vyhodnocení prohlásit, že uzel upevnění na výhybce č. 10 lépe tlumí vibrace při přechodu z křídlové kolejnice do pražce a také se dynamický ráz méně přenáší na další pražce.

10.5. Vyhodnocení ve frekvenční oblasti

Ve frekvenční oblasti jsem se nejprve zaměřil na analýzu přehledových grafů, které jsou na vybraných vlcích součástí přílohy měření v Poříčanech. U výhybky č. 10 je téměř na všech vlcích na pražcích nejvýraznější frekvence okolo 40 Hz - 50 Hz. Čím vyšší rychlostí vlak jel, tím se frekvence více blíží 50 Hz. Tato frekvence se dokonce přenáší až do šterkového lože. Frekvenci 50 Hz můžeme vidět i na křídlové kolejnici ve svislém směru jako jednu z významných frekvencí. Na křídlové kolejnici jsou však ještě další dominantní frekvence, první skupina je okolo 100 Hz, další mezi 200 Hz – 300 Hz a poslední mezi 400 Hz – 600 Hz. Na základě teoretického rozboru a rešerše literatury (kapitola 4), lze vyslovit hypotézu, že výrazná frekvenční složka zrychlení kmitání mezi 40 Hz – 50 Hz a okolo 100 Hz je pravděpodobně projevem síly P_2 . To souhlasí i v tom pohledu, že tato složka je jak na křídlové kolejnici, tak na pražcích a částečně i ve šterkovém loži. Síla P_2 se totiž přenáší na celý systém (kapitola 4). Rovněž fakt, že tato složka s rychlostí vlaků posouvá svoje těžiště směrem k vyšším frekvencím, souhlasí s teoretickým rozbohem. Při stejné vlnové délce se zvyšující rychlostí zvyšují i frekvence (Obr. 4.3). Přechod ve výhybce lze chápat jako určitou imperfekci o dané vlnové délce. Zrychlení kmitání na frekvenci mezi 200 Hz – 300 Hz a mezi 400 Hz – 500 Hz by pak mohly být projevem síly P_1 . Tato složka se totiž nepřenáší celým systémem a je nejvýraznější na křídlové kolejnici, kde se projevuje zvýšeným kontaktním napětím, frekvenčně by to i odpovídalo teoretickému rozboru (kapitola 4).

U výhybky č. 1 je situace ohledně dominantních frekvencí podobná, ale jisté odlišnosti tu jsou. Především zrychlení kmitání na frekvencích, které by mohli odpovídat síle P_2 , se posunuly směrem k vyšším frekvencím od 50 Hz po 70 Hz na snímači A3Z. Posunutí směrem k vyšším frekvencím je projevem větší tuhosti systému vozidlo-kolej. Na snímačích A10Z a A11Z se frekvence odpovídající síle P_2 posouvají ještě více k vyšším frekvencím okolo 90 Hz a na snímači A9Z až k 100 Hz. Z grafů je tedy patrné, že čím dále je snímač od přechodu, tak tím vyšší frekvence je dominantní. Na křídlové kolejnici ve svislém směru (snímač A4Z) je situace složitější, frekvence mezi 50 Hz – 70 Hz jsou rozeznatelné i zde. Záleží však na typu vlaku a rychlosti. Skladba vlaků na

výhybce č. 1 byla pestřejší. Významné frekvence se však většinou objevují mezi 200 Hz až 400 Hz. S vyšší rychlostí se významné frekvence posouvají k vyšším frekvencím a s lepším odpružením vozů se zase významné frekvence posouvají směrem k nižším frekvencím.

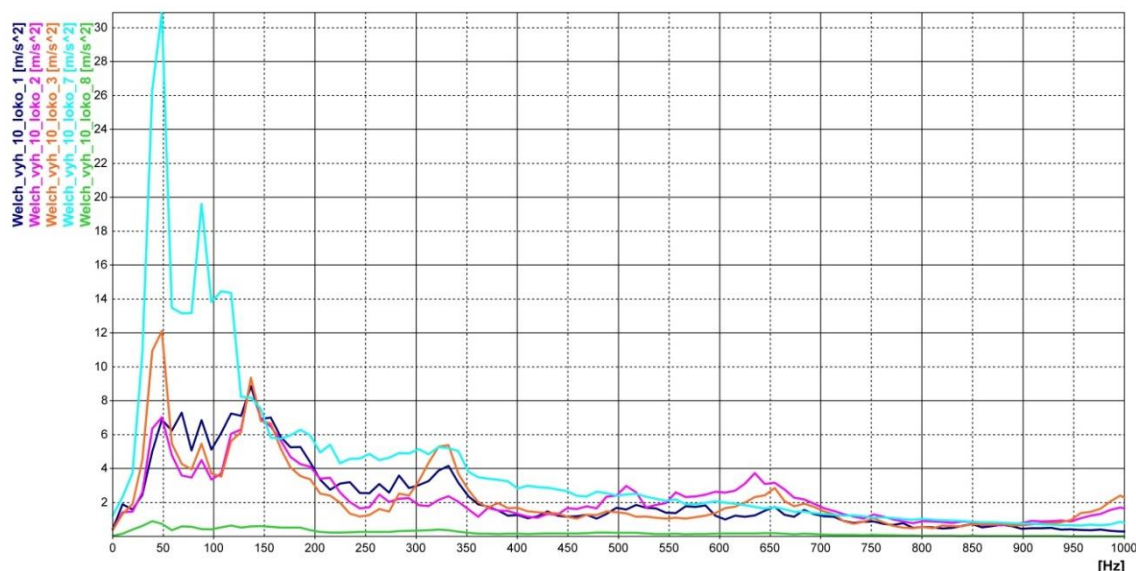
10.5.1. Vyhodnocení ve frekvenční oblasti – Welchova metoda

Pro podrobné srovnání ve frekvenční rovině jsem na obou výhybkách vybral časové výřezy, které odpovídají průjezdu lokomotivy. Na obou výhybkách byly vybrány 4 lokomotivy (na výhybce č. 1 se nedalo vybrat více vhodných lokomotiv) jedoucí rychlostí větší jak $115 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Lze předpokládat, že mezi lokomotivami jsou jen malé rozdíly a při stejné rychlosti jsou dynamické účinky od jejich průjezdu velmi podobné, proto byly vybrány do podrobnější frekvenčního srovnání. Na každé lokomotivě jsem spočítal frekvenční spektrum Welchovou metodou a to u všech snímačů (získal jsem tak 12 frekvenčních spekter pro každou lokomotivu a 4×12 frekvenčních spekter pro výhybku). Poté jsem pro obě výhybky sečetl frekvenční spektra 4 lokomotiv z odpovídajících si signálů a udělal z nich jedno průměrné frekvenční spektrum (dostal jsem tak pro každou výhybku 12 spekter). Tyto spektra jsem poté sestavil do grafů. První graf zobrazuje pražec pod srdcovkou (Obr. 10.6 a 10.7), na druhém grafu jsou snímače podél srdcovky (Obr. 10.8 a X.9) a na třetím je přechod z křídlové kolejnice do šterkového lože (obrázky jsou v přílohách měření v Poříčanech). Tyto tři typy grafů jsem vytvořil pro obě výhybky. Poté jsem vytvořil ještě jeden srovnávací graf obou výhybek pro snímače A4Z, A3Z a A0Z, tedy pro přechod vibrací ve svislém směru z křídlové kolejnice do šterkového lože (Obr. 10.10). Všechny grafy jsou rovněž součástí přílohy k měření v Poříčanech, kde jsou vyobrazeny na celou stranu.

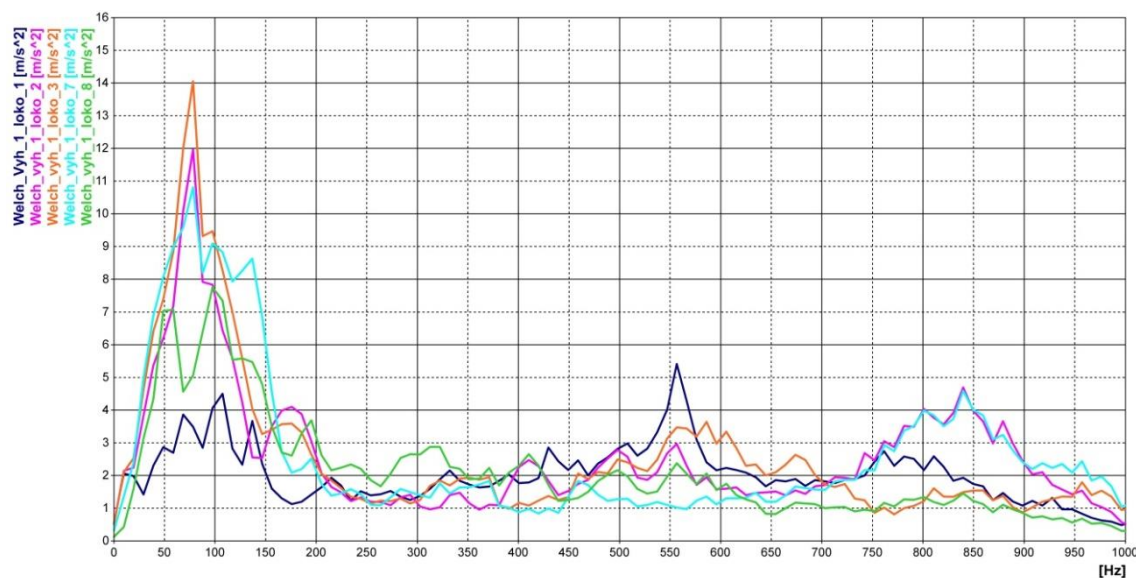
Na grafech, kde jsou snímače z pražce pod srdcovou (Obr. 10.6 a 10.7), je vidět rozdíl mezi oběma výhybkami. Na výhybce č. 1 (Obr. 10.7) je výrazný frekvenční vrchol okolo 75 Hz a to především na snímačích A3Z, A2Z a A7Z, tedy v okolí dynamického rázu. Zrychlení kmitání na frekvencích, které pravděpodobně odpovídají síle P_2 , je zde velmi výrazné. Na výhybce č. 10 (Obr. 10.6) je sice také výrazný frekvenční vrchol, který odpovídá síle P_2 , ale je na 50 Hz, což značí větší pružnost celého systému a především zdaleka největší jsou účinky na snímači A7Z. Důvod je zřejmě v konstrukci pražce, který je dělený a snímač A7Z je tak na jeho konci. V ose koleje se rovněž pražce nepodbíjejí, proto se zde vytvořila mezera mezi pražcem a šterkem a pražec zde při průjezdu vlaku výrazně kmitá, neboť není podepřen. Otázka je, zda to může mít vliv negativní vliv na chování konstrukce jako celku, v tomto případě se to negativně neprojevuje.

Na snímačích podél srdcovky výhybky je rovněž vidět rozdílné chování obou konstrukcí. Na výhybce č. 10 (Obr. 10.8) jsou jednoznačně nejvýraznější hodnoty na snímači A3Z, tedy na tom, který je na pražci přímo u přechodu a kde jsou nejvýraznější

dynamické účinky. Je vidět, že zrychlení kmitání na frekvencích okolo 50 Hz, které odpovídá síle P_2 , je poměrně dobře utlumené a do okolních pražců se šíří jen málo. Další frekvenční špičky na snímači A3Z, které odpovídají spíše síle P_1 se do okolních pražců nepřenášejí téměř vůbec.



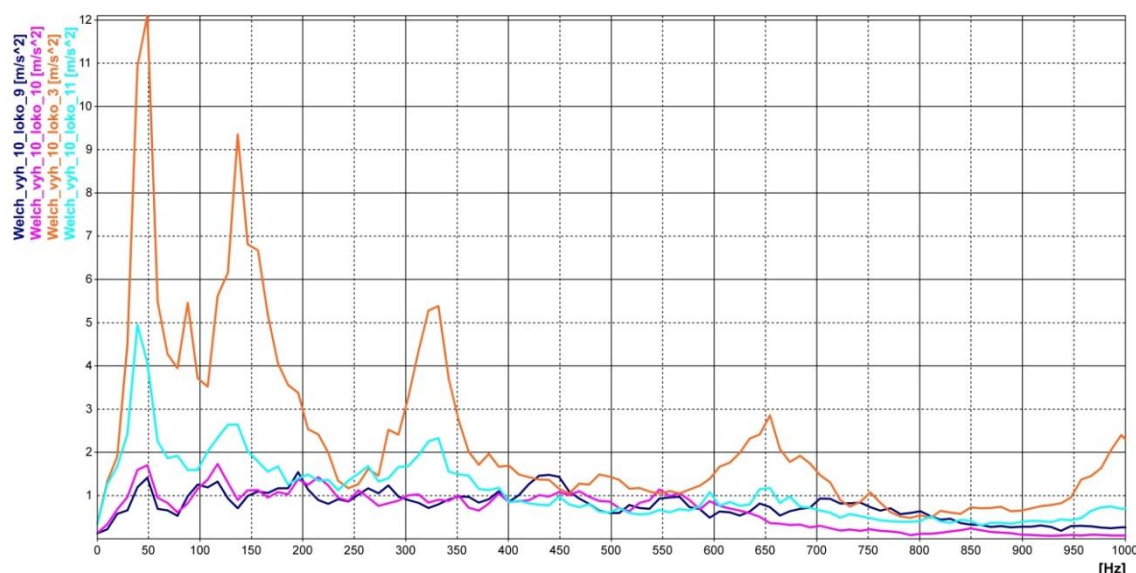
Obr. 10.6 *Welchova metoda, pražec pod srdcovkou, výhybka č. 10 (poslední číslo je číslo snímače zrychlení z metodiky)*



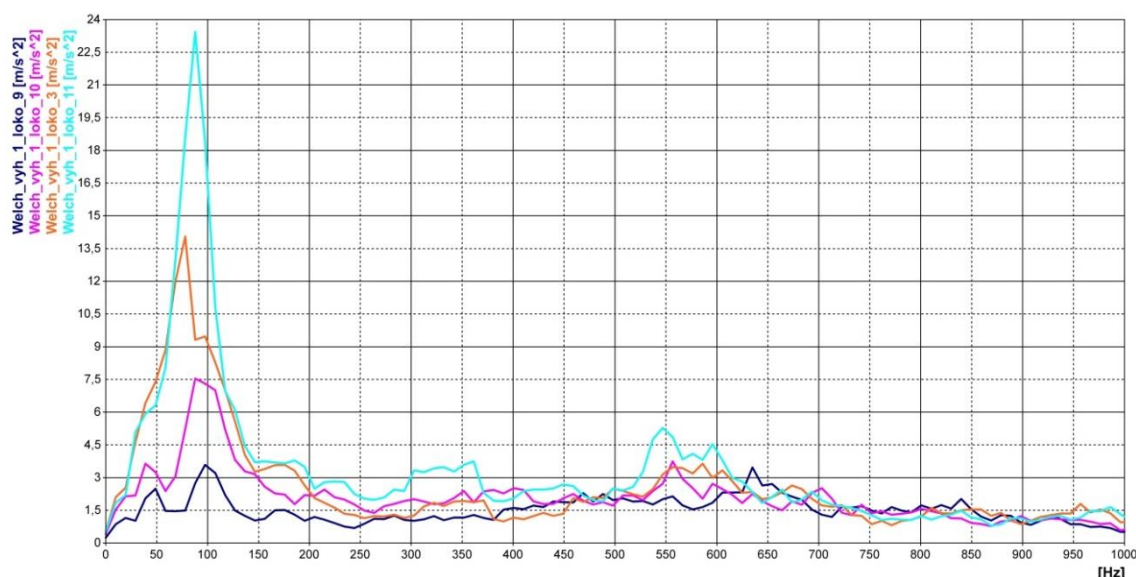
Obr. 10.7 *Welchova metoda, pražec pod srdcovkou, výhybka č. 1 (poslední číslo je číslo snímače zrychlení z metodiky)*

Na výhybce č. 1 (Obr. 10.9) jsou nejvýraznější hodnoty na snímači A11Z, může to značit, že k přechodu kola z hrotu srdcovky na křídlovou kolejnici dochází spíše blíže k tomuto snímači. Frekvenční špičky odpovídající síle P_2 jsou na snímači A11Z na 80 Hz na snímači A3Z na 75 Hz a na snímači A10Z na 90 Hz a na snímači A9Z na 100

Hz. I zde dochází k utlumení dynamického rázu, ale útlum je pozvolnější a ráz se do okolních prazců přenáší více, než je tomu u výhybky č. 10. Celkový posun frekvenčních složek směrem k vyšším frekvencím může být známkou vyšší tuhosti konstrukce výhybky č. 1. Maxima odpovídající síle P_2 jsou zde podstatně vyšší, lze tedy předpokládat, že i životnost výhybky může být menší.



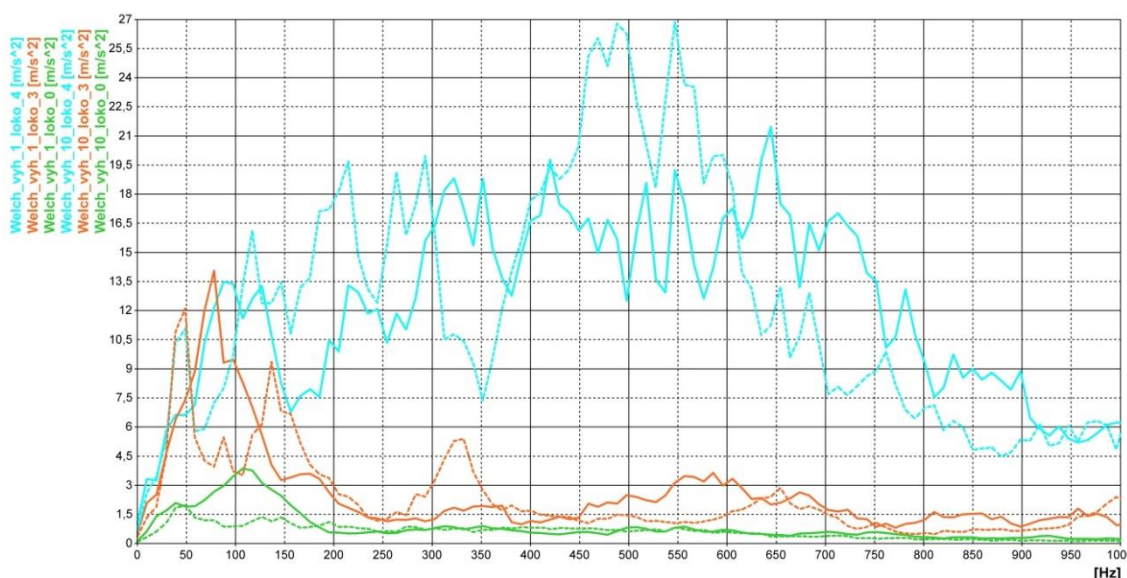
Obr. 10.8 Welchova metoda, prazce podél srdcovky, výhybka č. 10 (poslední číslo je číslo snímače zrychlení z metodiky)



Obr. 10.9 Welchova metoda, prazce podél srdcovky, výhybka č. 1 (poslední číslo je číslo snímače zrychlení z metodiky)

Jelikož příčný a podélný směr na křídlové kolejnici nejsou z frekvenčního hlediska v tomto měření zajímavé, v dalším grafu na Obr. 10.10 uvádím rovnou srovnání obou výhybek z hlediska přechodu dynamického rázu ve svislém směru konstrukcí. Grafy pro

výhybku č. 10 jsou čárkovanou čarou. Na křídlové kolejnici (snímač A3Z) je vidět u výhybky č. 1 posun směrem k vyšším frekvencím oproti výhybce č. 10. Frekvence odpovídající síle P_2 jsou na výhybce č. 1 na 80 Hz a 130 Hz, zatímco na výhybce č. 10 je to 50 Hz. Zde je patrná vyšší tuhost výhybky č. 1. To je vidět i na frekvencích, které odpovídají síle P_1 . Na výhybce č. 10 je to oblast frekvencí mezi 200 až 300 Hz, zatímco na výhybce č. 1 je to oblast frekvencí mezi 320 až 350 Hz. Celkově mírně vyšších hodnot dosahuje na křídlové kolejnici výhybka č. 10, což značí větší síly a horší geometrii přechodu. Posun frekvencí odpovídajících síle P_2 směrem k vyšším frekvencím je vidět u výhybky č. 1 i na pražci (snímač A3Z). U výhybky č. 10 je to frekvence 50 Hz a u výhybky č. 1 frekvence 75 Hz. Vyšších hodnot je dosaženo u výhybky č. 1, což značí větší zatížení na pražci. Na výhybce č. 10 se do pražce ještě prokopírovaly frekvence okolo 130 Hz a pak frekvence, které jsou spíše úměrné síle P_1 (325 Hz), to může být pružnějším upevněním výhybky. Do šterkového lože se přenesla u výhybky č. 1 větší část dynamického rázu s frekvenčními vrcholy okolo 40 Hz a 110 Hz. Na výhybce č. 10 se prokopíroval jen jeden frekvenční vrchol okolo 45 Hz. Celkově lze předpokládat u výhybky č. 1 větší zatížení šterkového lože.



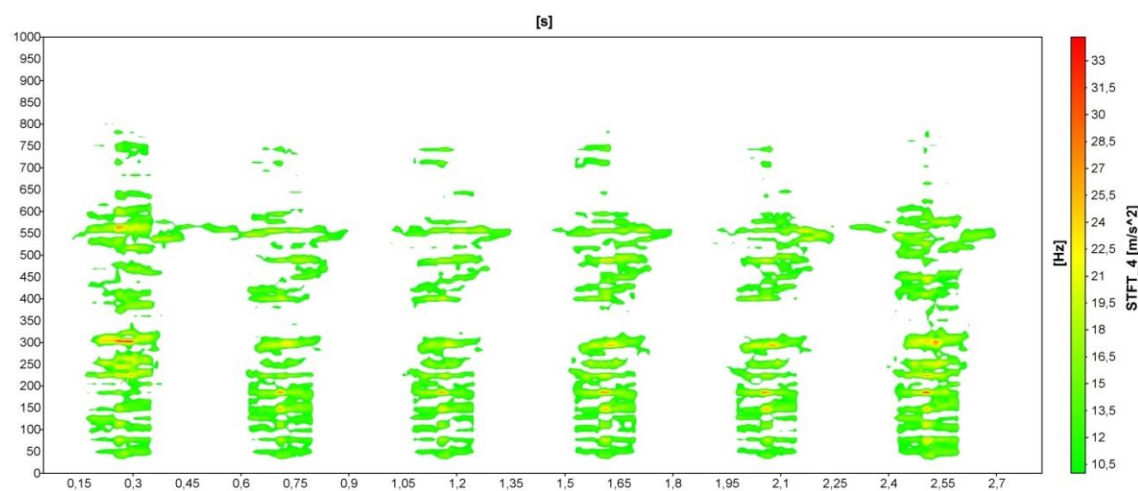
Obr. 10.10 Welchova metoda, srovnání přechodu z křídlové kolejnice do šterkového lože na výhybce č. 1 a č. 10 (čárkovaně)

10.6. Vyhodnocení v časově-frekvenční oblasti – STFT

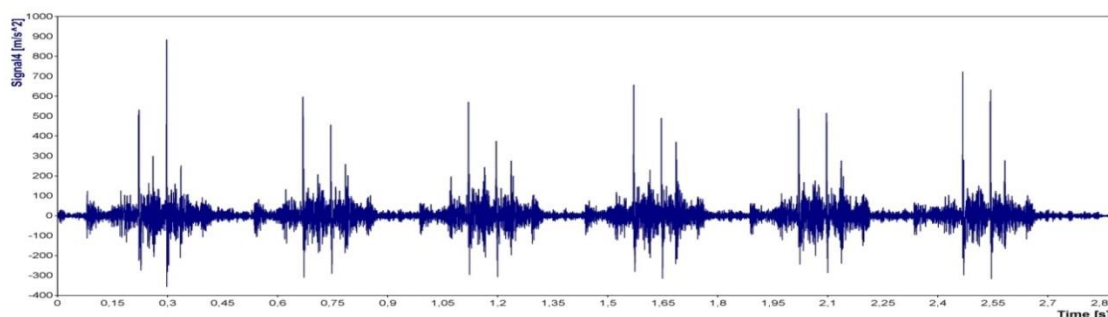
Časově-frekvenční vyhodnocení nám umožní vyhodnotit nejen velikosti jednotlivých frekvencí, ale také jejich rozložení v čase. Je tak možné ohodnotit dynamické působení jednotlivých podvozků, případně náprav vlaku. Do disertační práce jsem vybral přechod z křídlové kolejnice do šterkového lože na soupravách LEO Express. Tyto soupravy jsou nové a lze u nich předpokládat, že jsou zcela srovnatelné. Také jsem chtěl ukázat působení jednotlivých podvozků (náprav) a to by na výrezích lokomotiv nebylo příliš

vhodné, na ucelené soupravě je to vidět lépe. Na obou výhybkách jsem vybral soupravy jedoucí přibližně stejnou rychlostí. Pro ně jsem vypočítal STFT a zpracoval hustotní spektrogram (spektrogramy jsou součástí přílohy měření v Poříčanech, kde jsou i přehledněji vyobrazeny na celou stranu). Na hustotním spektrogramu je na ose x čas na ose y frekvence a barevná stupnice určuje velikost zrychlení na jednotlivých frekvencích. Časově-frekvenční analýza potvrzuje závěry z analýzy frekvenční. Pro prezentaci v textové části disertační práce jsem vybral snímač na křídlové kolejnici ve svislém směru A4Z na soupravách LEO Express na obou výhybkách (Obr. 10.11 a 10.13).

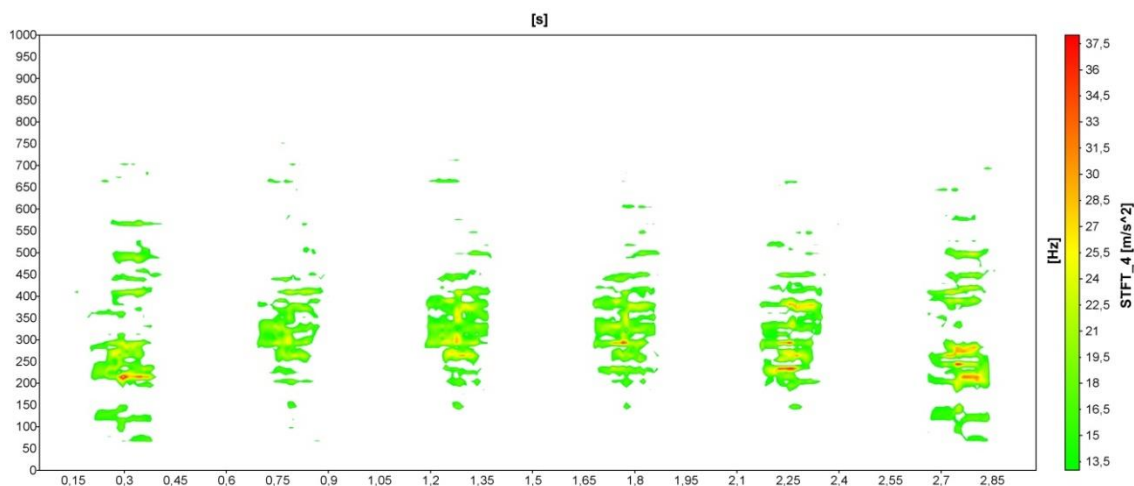
Na Obr. 10.11 je vidět, že klíčové frekvence časově skutečně odpovídají průjezdu jednotlivých náprav vlaku. Časový průběh je na Obr. 10.12. Také je vidět, že klíčové frekvence jsou rozloženy rovnoměrně od 40 Hz do 600 Hz se špičkami na 50 Hz, mezi 150 Hz a 200 Hz, a také okolo 300 Hz. Na Obr. 10.12 je vidět, že první podvozek má výraznější maximum, to se také projevuje na STFT, kde je oproti ostatní podvozkům mnohem výraznější frekvence okolo 300 Hz. Lze tedy říci, že se jedná o frekvenční složku zrychlení kmitání odpovídající síle P_1 . Díky STFT jsem tedy schopen ohodnotit i rozdíl mezi jednotlivými podvozky vlaku.



Obr. 10.11 STFT, křídlová kolejnice – svislý směr A4Z, výhybka č. 10



Obr. 10.12 Časový průběh zrychlení vibrací, křídlová kolejnice – svislý směr A4Z, výhybka č. 10



Obr. 10.13 STFT, křídlová kolejnice – svislý směr A4Z, výhybka č. 1

Na Obr. 10.13 je vidět hustotní spektrogram pro výhybku č. 1. Zde se výrazné frekvenční složky pohybují v pásmu frekvencí mezi 50 Hz a 500 Hz se špičkami mezi 200 Hz a 300 Hz. Zajímavé je, že první a poslední náprava mají výrazné frekvenční vrcholy mezi 50 Hz a 150 Hz. Dle mého názoru to může být tím, že při nájezdu první nápravy vlaku dojde ke stlačení konstrukce a za poslední nápravou k odlehčení. Zde se tedy nejvíce projeví frekvenční působení síly P_2 , která se projevuje právě tímto způsobem.

10.7. Celkové vyhodnocení měření v Poříčanech

Měření prokázala přínos uzlu upevnění s vulkanizovanými podložkami na snížení dynamického rázu působícího na srdcovku výhybky. Lze konstatovat, že uzel upevnění s vulkanizovanými podložkami nejen lépe tlumí dynamické namáhání, ale také snižuje namáhání okolních pražců. To se potvrdilo jak na časové, tak na frekvenční analýze. Z frekvenčního hlediska byl jednoznačně vidět posun frekvencí spojených s dynamickým namáháním směrem k vyšším hodnotám u výhybky č. 1, což je znak vyšší tuhosti u této konstrukce. Tento závěr vychází z teoretických studií, které jsou zmíněny v kapitole 4. Výsledky korespondují i se zkušenostmi z údržby, kdy výhybka č. 10 je vnímána jako bezproblémová pro provoz a nevykazuje od svého vložení žádné problémy.

Ukázalo se, že metodika měření spolu s vhodnými matematickými postupy ve fázi vyhodnocení dokáže velmi dobře sledovat dynamické zatížení konstrukce výhybky a ohodnotit vliv jednotlivých konstrukčních řešení. Z vyhodnocení vyplývá nejen přínos uzlu upevnění s vulkanizovanými podložkami na snížení dynamických účinků na pražci, ale rovněž přínos děleného pražce, kdy se do odbočné větve výhybky přenáší menší zatížení. Je tedy předpoklad, že nebude docházet k nežádoucímu převýšení pražce při jednostranném pojíždění výhybky. Díky metodice měření a vyhodnocovacím

postupů v oblasti časové a především frekvenční jsem schopen všechny tyto záležitosti zachytit a zhodnotit.

11. Měření v žst. Choceň

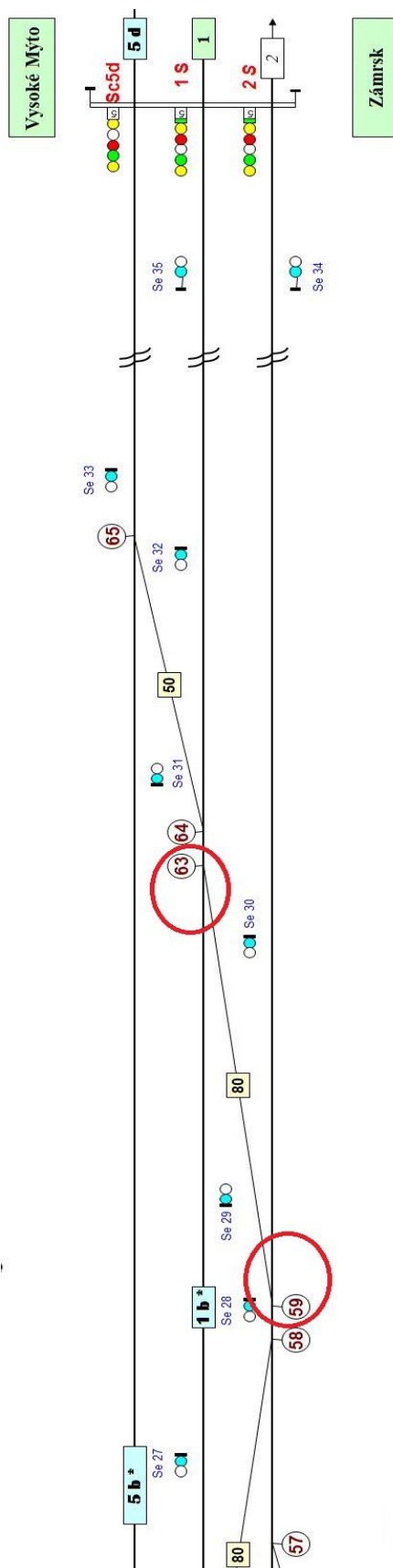
Měření v žst. Choceň bylo realizováno na podnět TÚDC, kdy bylo z výstupů měřicího vozu zjištěno výrazné zatížení na výhybce č. 59 na pardubickém zhlaví. S touto výhybkou byly také problémy s častou údržbou a výměnou srdcovky. Proto jsem se rozhodl dynamické účinky působící na tuto konstrukci změřit. Na výhybce byla provedena tři měření. Jedno bylo srovnávací (pro porovnání byla vybrána výhybka č. 63), aby bylo možné porovnat dynamické účinky na výhybce č. 59 s jinou výhybkou, která je na tom z hlediska ojetí a údržby lépe a další dvě měření byly realizovány s cílem sledovat přínos opravného zásahu. Cílem bylo srovnat dvě výhybky, které jsou z hlediska ojetí srdcovky v rozdílném stavu, a také stanovit efektivitu opravných zásahů na výhybce č. 59. V době měření se již na hrotu srdcovky výhybky č. 59 vyskytovala kontaktně únavová vada (Obr. 11.1).



Obr. 11.1 Hrot srdcovky výhybky č. 59 s kontaktně únavovou vadou

11.1. Popis lokality měření a měřených výhybek

Pro srovnávací měření byla vybrána výhybka č. 63 jako nejvhodnější, jedná se o stejnou konstrukci výhybky s tím rozdílem, že v době měření měla novou srdcovku. Výhybka č. 59 měla měněnou srdcovku v roce 2009 a výhybka č. 63 měla měněnou srdcovku v roce 2012. Obě konstrukce jsou součástí jednoduché kolejové spojky, soustavy železničního svršku UIC 60, na betonových pražcích, s upevněním Vossloh Skl 24. Obě jsou pojížděny proti hrotu, s úhlem odbočení 1:14 a poloměrem odbočení 760 m, typ výhybek je J60-1:14-760-zlp,L,p,ČZP,b,KS,ZPT. Výhybky mají stejné srdcovky od stejného výrobce Bari Fonderie Meridionali. Výrobcem výhybek je DT - Výhybkárna a strojírna, a.s.. Schéma pardubického zhlaví žst. Choceň s vyznačenými výhybkami je na Obr. 10.2.



Obr. 10.2 Schéma části zhlaví žst. Choceň, měřené výhybky jsou označeny červenou elipsou [93]

11.2. Měření ojetí laserovým profiloměrem

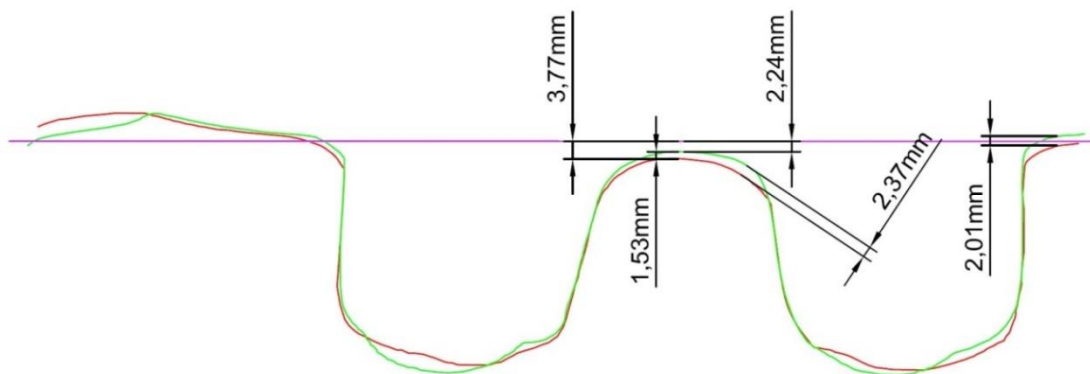
Před měřením dynamických účinků působících na výhybky proběhlo měření laserovým profiloměrem KPJ01 – Kontura (Obr. 10.3). Pomocí laserového profiloměru byly změřeny příčné profily srdcovky po 2,5 mm. Před samotným měřením bylo nutné výhybky nastříkat bílou křídou ve spreji, aby se laser dobře a rovnoměrně odrážel od povrchu kolejnic (Obr. 10.4). Do matematického bodu křížení se umístil magnet, podle kterého se profiloměr orientoval a odčítal délky. Výsledkem měření byly jednotlivé příčné profily (řezy) srdcovkou. Původní záměr byl srovnat zcela přesně ojetí na obou srdcovkách. Obě srdcovky měly být stejné, jednalo se o stejné číslo srdcovky, štíhlost, jen rok výroby byl samozřejmě různý. Tento předpoklad se bohužel nenaplnil. Výrobce jemně změnil hloubku žlábků a tím pádem nešlo výhybky srovnat pomocí programu automaticky, tato záležitost byla odhalena až po vyhodnocení měření profiloměrem. Proto jsem řezy musel srovnávat ručně. Do disertační práce jsem vybral řez v místě, kde kolo přechází z křídlové kolejnice na hrot srdcovky (vzdálenost 400 mm od matematického bodu křížení). Srovnání řezů je na Obr. 10.5. Je vidět, že výhybka č. 59 (profil červenou barvou) vykazuje přece jen větší ojetí.



Obr. 10.3 *Profiloměr KPJ01 – Kontura při měření na výhybce*



Obr. 10.4 *Srdcovka výhybky s nástřikem bílou křídou*



Obr. 10.5 Srovnání profilu srdcovek výhybek č. 59 a 63 v místě přechodu kola z křídlové kolejnice na hrot srdcovky

11.3. Přesná nivelace

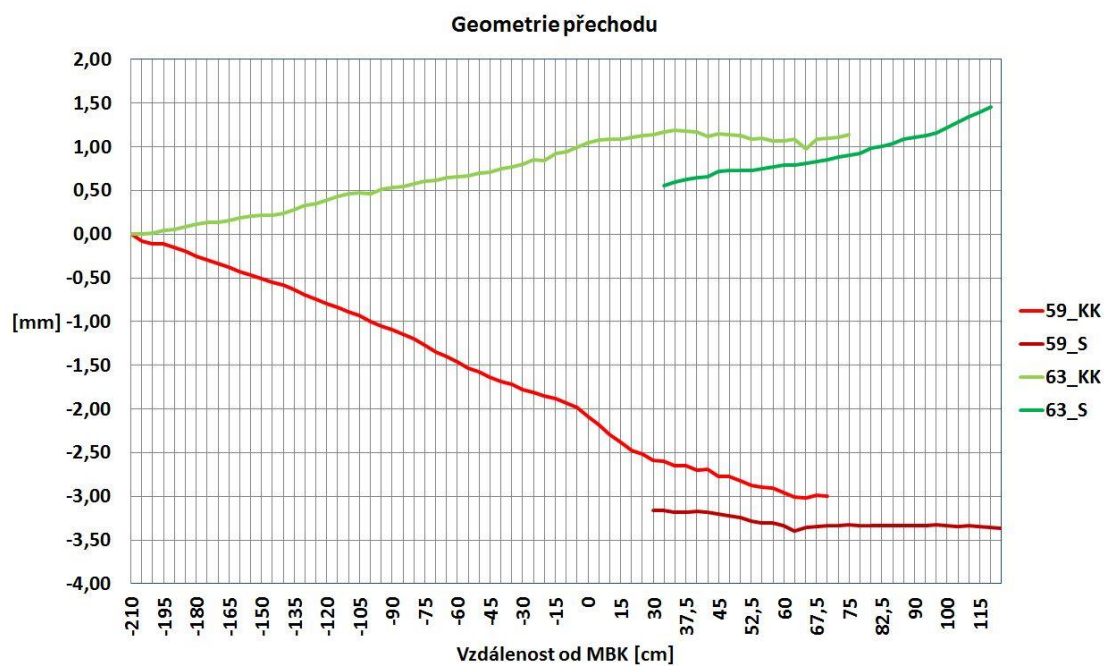
Protože srovnání pomocí profiloměru nebylo možné provést zcela přesně, rozhodl jsem se na obou výhybkách změřit výškový profil křídlové kolejnice a hrotu srdcovky přesnou nivelací. Tím jsem získal další informaci ke geometrii přechodu kola z křídlové kolejnice na hrot srdcovky. Přesnou nivelaci jsme s kolegy provedli ve dvou datech. Poprvé 11. 5. 2013 po prvních měřeních na výhybce č. 59 a 63. Při tomto prvním měření byly změřeny srdcovky výhybky 59 i 63. Druhé měření proběhlo 25. 7. 2013 na výhybce č. 59. Toto měření mělo za cíl změřit geometrii přechodu po opravě výhybky č. 59 navařením srdcovky, které proběhlo 4. 6. 2013.

Měření přesnou nivelací bylo provedeno tak, že od matematického bodu křížení byly na výhybce rozměřeny řezy. Směrem k hrotu srdcovky byly číslovány kladnými čísly (Obr. 10.6) a od hrotu srdcovky čísla zápornými. Řezy byly od sebe vzdáleny 50 mm a v oblasti, kde kolo přechází z křídlové kolejnice na hrot srdcovky, byly ještě zhuštěny na 25 mm. Celkem bylo měřeno 96 řezů, přičemž v 17 řezech byly měřeny dva body (jak na křídlové kolejnici, tak na hrotu srdcovky). Z měřených hodnot vznikly výškové průběhy křídlové kolejnice a hrotu srdcovky, které jsou zobrazeny grafy na Obr. 10.7 a 10.8. Nivelace byla provedena nivelačním přístrojem KONI 007.

Na grafech z prvního měření (Obr. 11.7) je vidět srovnání výškových průběhů křídlové kolejnice a hrotu srdcovky na výhybce č. 59 a 63. Zelenou barvou je znázorněn průběh výšek u výhybky č. 63, červenou barvou jsou znázorněny průběhy na výhybce č. 59. Z grafu na Obr. 11.7 je vidět, že lepší geometrii přechodu má výhybka č. 63, čímž se potvrdily závěry z měření laserovým profiloměrem.

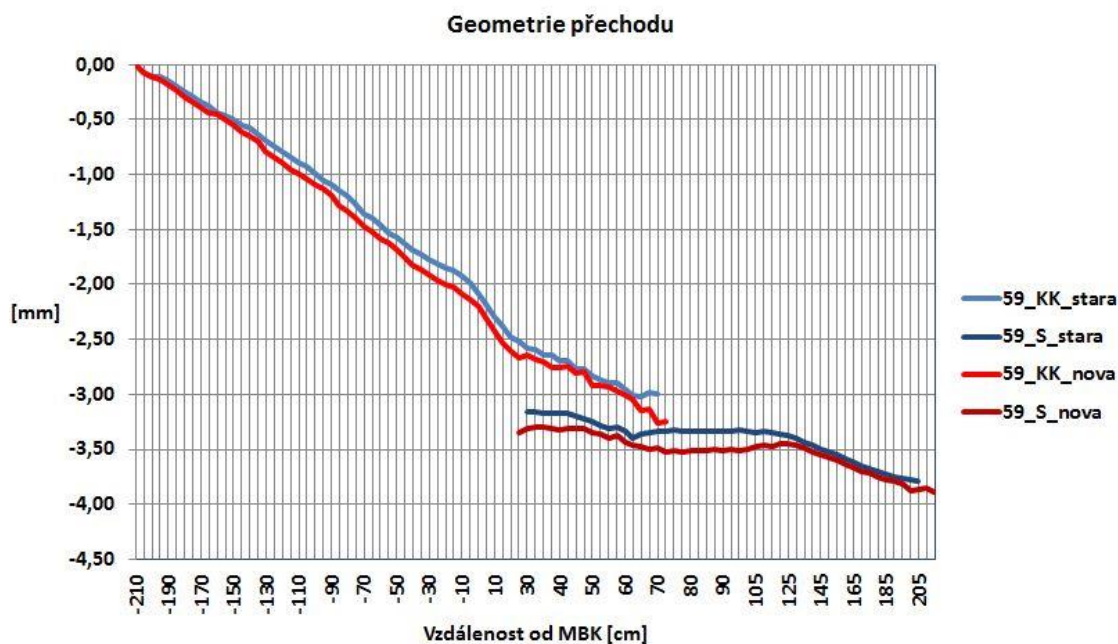


Obr. 11.6 Označení řezů na křídlové kolejnici



Obr. 11.7 Srovnání výškových průběhů křídlové kolejnice a hrotu srdcovky na výhybce č. 59 a 63

Další přesnou nivelaci jsem s kolegy měřil dne 25. 7. 2013. Toto měření bylo po opravě srdcovky výhybky č. 59 navařením (Obr. 11.8). Z grafu je vidět, že po navaření došlo k mírnému zlepšení geometrie přechodu ve výhybce.



Obr. 11.8 Srovnání výškových průběhů křídlové kolejnice a hrotu srdcovky na výhybce č. 59 před (modré křivky) a po opravě navařením srdcovky (červené křivky)

11.4. Metodika a parametry měření

Pro všechna měření v Chocni byla použita metodika měření pohybového chování a metodika měření zrychlení vibrací v srdcovkové části výhybky tak, jak je popsána v kapitole 6 (Obr. 6.1). Měření tenzometry nebyla realizována, protože provozní podmínky to nedovolovaly. Parametry měření jsou uvedeny níže:

- Vzorkovací frekvence: 10kHz
- Dolní propust: 1kHz
- Horní propust: 3Hz (ve štěrku 0,3Hz)
- Počet měřených kanálů: 17 (8 – pohyby, 9 – vibrace)
- Počet měřicích dnů: 4 (25. 3. 2013 – výhybka č. 59)
(8. 4. 2013 – výhybka č. 63)
(1. 7. 2013 – výhybka č. 59)
(9. 6. 2014 – výhybka č. 59)
- Počet změřených vlaků: vždy minimálně 20

První dvě měření byla provedena jako srovnávací. Cílem bylo srovnat dynamické účinky na dvou stejných výhybkách s různým stavem ojetí srdcovky. Další měření na výhybce č. 59 byla realizována, aby bylo možné studovat vliv opravného zásahu na dynamické účinky. Chronologie prací a měření na výhybkách je uvedena přehledně níže:

➤ Měření profiloměrem KPJ01 – Kontura	4. 3. 2013
➤ Měření dynamických účinků na výhybce č. 59	25. 3. 2013
➤ Měření dynamických účinků na výhybce č. 63	8. 4. 2013
➤ Přesná nivelace na srdcovkách výhybek č. 59 a 63	11. 5. 2013
➤ Oprava navařením srdcovky výhybky č. 59	4. 6. 2013
➤ Měření dynamických účinků na výhybce č. 59	1. 7. 2013
➤ Přesná nivelace na srdcovce výhybky č. 59	25. 7. 2013
➤ Srdcovka výh. č. 59 podbita úderovými podbíječkami	9. 12. 2013
➤ Měření dynamických účinků na výhybce č. 59	9. 6. 2014

11.5. Vyhodnocení měření v žst. Chocně

Vyhodnocení měření je rozděleno do dvou bloků, tím prvním je pohybové chování výhybek a tím druhým je vyhodnocení zrychlení vibrací na konstrukci výhybek. V obou blocích nejprve srovnám výhybku č. 59 s výhybkou č. 63 a poté se budu věnovat srovnání jednotlivých měření na výhybce č. 59. V pohybovém chování konstrukcí budu hodnotit vždy pohyby pražce pod srdcovkou a pohyby pražců podél srdcovky. U zrychlení vibrací budu hodnotit zejména roznos vibrací pražcem a přenos do šterkového lože. Hodnocení vibrací bude dále rozděleno jako u měření v žst. Pořičany na část časovou, frekvenční a časově-frekvenční. Tímto způsobem byly získány komplexní informace o chování výhybek pod zatížením.

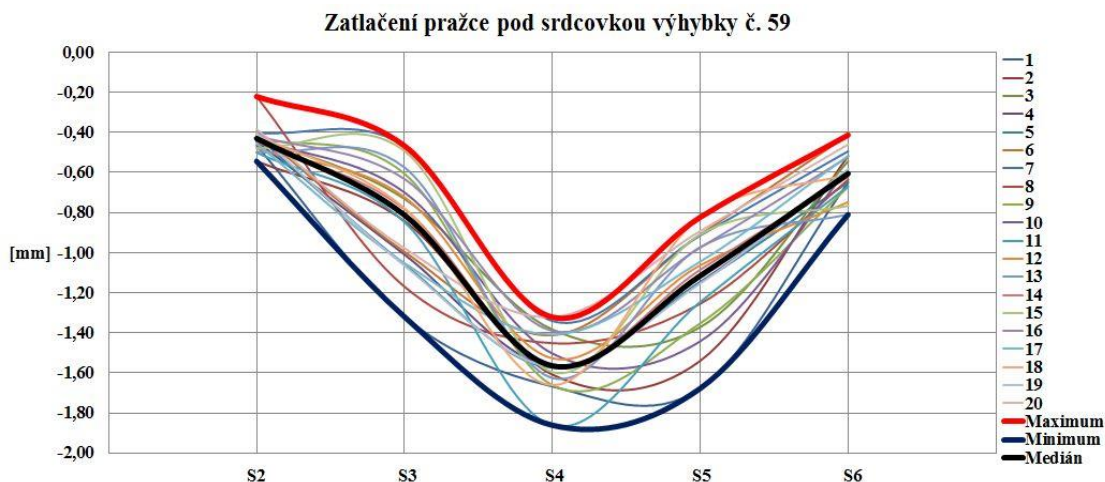
11.6. Vyhodnocení pohybového chování

Při vyhodnocování pohybového chování konstrukce jsem si nejprve připravil přehledné grafy pohybů pražců po délce srdcovky a pohybů pražce pod srdcovkou. Vybral jsem jen část grafů, které reprezentovaly typické vlaky (rychlíky s lokomotivou, ucelené jednotky, osobní vlaky a nákladní vlaky). Tyto grafy jsou součástí přílohy měření v Chocni. V grafech jsou vlevo pod sebou snímače, které sledují pohyby pražců podél srdcovky a vpravo pod sebou jsou snímače na pražci pod srdcovkou. Z grafů lze vypožorovat, že velmi často dojde před prvním kolem vlaku nejprve k minimálnímu zdvihu pražce a až poté k zatlačení pražce. Tuto skutečnost lze přičíst určité “zdvihové vlně“, kterou vlak před sebou tlačí. Někdy se tento jev objevuje i dalších vozů, ne jen u prvního kola lokomotivy. Z grafů je také patrné, že mezi nápravami dojde k odlehčení a mezi jednotlivými podvozky se pražec vrací téměř zpět do původní polohy.

U všech vlaků jsem odečetl hodnotu maximálního zatlačení na každém snímači, od každého vlaku jsem tak získal 8 hodnot. Tyto hodnoty jsem poté zanesl do tabulek, které jsou součástí přílohy měření v Chocni. Pro každé měření jsem zpracoval dvě tabulky, v první jsou maximální zatlačení pražců podél srdcovky výhybky a v druhé jsou maximální zatlačení na pražci pod srdcovkou. Z tabulek a přehledných grafů je zřejmé, že hodnoty zatlačení pražců jsou závislé také na hmotnosti na nápravu. Největší zatlačení většinou dosahují hnací vozidla (lokomotivy), menší pak osobní vozy. Překvapivé však je, že zatlačení jsou částečně závislá i na rychlosti vlaků. Některé vlaky, které jely velmi pomalu (méně než $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$), vykazují menší zatlačení i jak mnohem lehčí ucelené soupravy (např. LEO Express a Pendolino), které jely rychlostí přes $140 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Tento fakt připisuji působení dynamických účinků na měřené výhybky, které s rychlostí zřetelně narůstají.

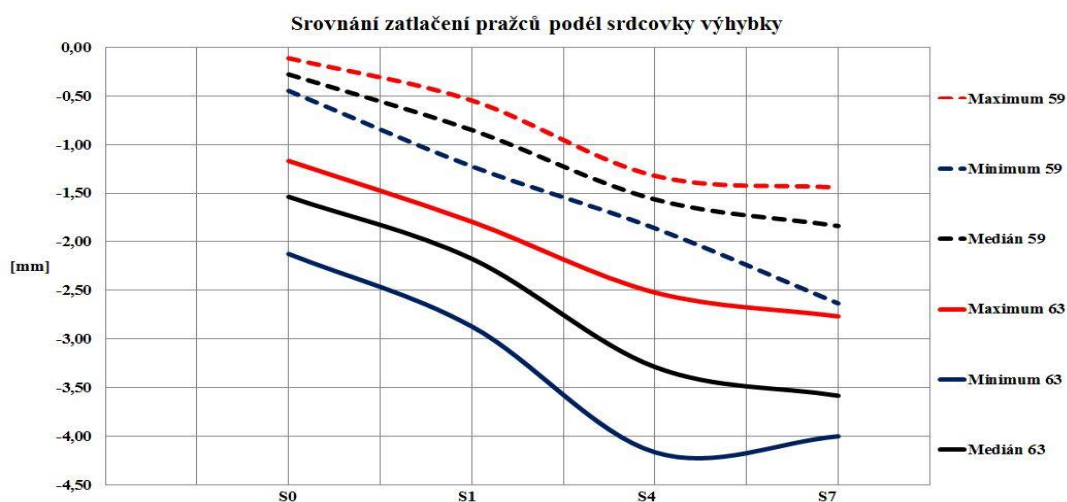
U měření 9. 6. 2014 byl problém s magnetickým držákem a než se povedlo problém vyřešit, byly na snímači S6 některé průjezdy nepoužitelné. Takové hodnoty zatlačení, které neodpovídají realitě jsou v tabulce v přílohách měření v Chocni vyznačeny červenou barvou. Tyto hodnoty nebyly brány v úvahu ani při výpočtu křivek zatlačení. Po této zkušenosti byla metodika měření inovována a magnetické držáčky byly v metodice nahrazeny jinými držáčky. Ty jsou vidět na fotodokumentaci z měření v Ústí nad Orlicí.

Z tabulek maximálních zatlačení jsem zpracoval přehledné grafy “průhybových křivek“, které charakterizují chování pražců po délce srdcovky a pražce pod srdcovkou. Tyto grafy jsem zpracoval pro porovnání pohybového chování výhybek č. 59 a 63 a poté ještě pro porovnání pohybového chování výhybky č. 59 z jednotlivých měření. Na svislé ose je hodnota zatlačení pražce a na vodorovné ose jsou jednotlivé snímače. Křivky minim a maxim z grafů jsou obalovými křivkami maximálních zatlačení na pražcích od všech změřených vlaků (*Obr. 11.9*) a z těchto křivek vychází i křivka medián. Medián jsem vybral proto, že podle mého názoru nejlépe reprezentuje sledovaný děj a neovlivní ho tolik jednotlivé extrémní hodnoty minim a maxim. Všechny grafy jsou i v příloze k měření v Chocni, kde jsou zobrazeny přehledně na celou stranu.

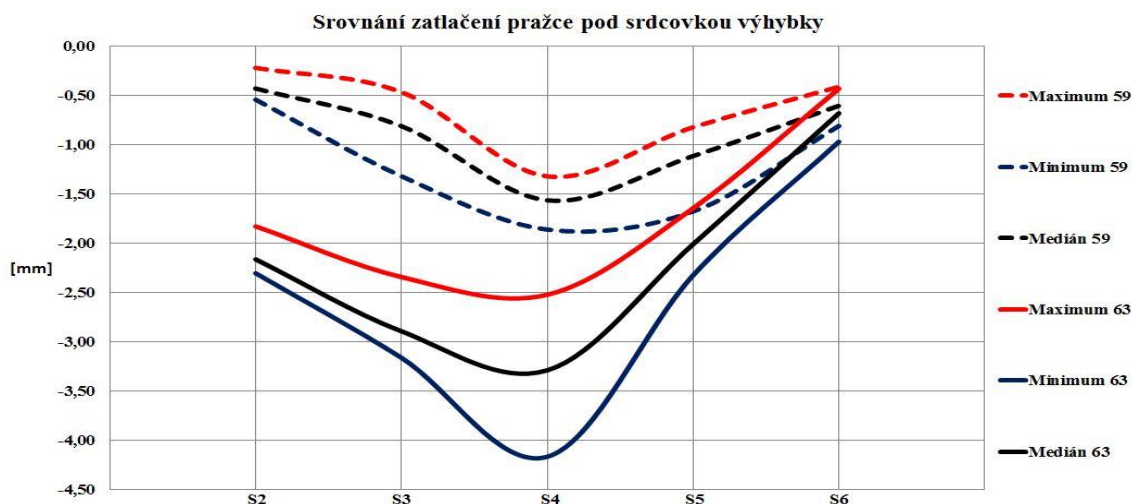


Obr. 11.9 Ukázka, jak vznikly křivky minim, maxim a mediánu u průhybových křivek, čísla v legendě odpovídají číslům vlaků z tabulky změřených vlaků

Na Obr. 11.10 je graf průhybových křivek po délce pražce. Jde o srovnání výhybek č. 59 a 63. Z grafu je patrné, že výhybka č. 63 vykazuje až o 1,5 mm větší zatlačení pražců. Na výhybce č. 59 se zatlačení rovnoměrně zvětšují od snímače S0 po snímač S7. To je poněkud nečekané, očekával jsem maximální pohyby na snímači S4, který je na pražci přímo pod přechodem, místem, kde kolo přechází z křídlové kolejnice na hrot srdcovky. Podobné je to i u výhybky č. 63 jen s tím rozdílem, že mezi snímačem S1 a S4 je sklon křivky větší a mezi snímačem S4 a S7 je sklon malý. Pouze křivka maximálních zatlačení na výhybce č. 63 se chová částečně tak, jak jsem předpokládal a jak vyplývá z teoretických předpokladů. Vysvětlení tohoto faktu může být v železničním spodku a jeho malé deformační odolnosti. Zvláště zatlačení na výhybce č. 63 jsou již poměrně velké.



Obr. 11.10 Srovnání průhybových křivek na pražcích podél srdcovky u výhybek č. 59 (čárkovaně) a 63 (plná čára)

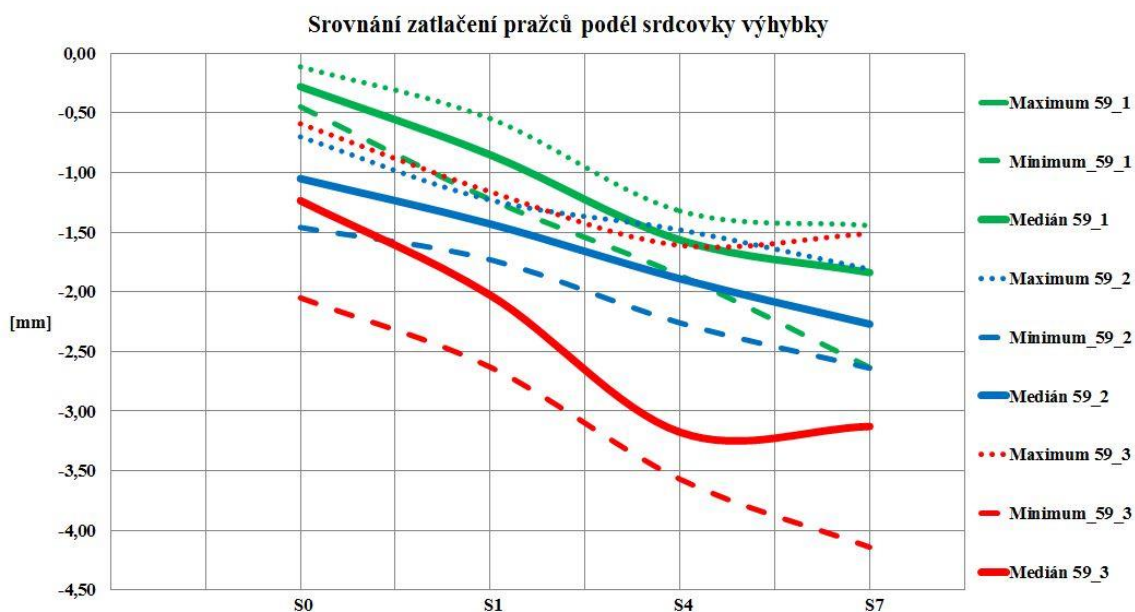


Obr. 11.11 Srovnání průhybových křivek na pražci pod srdcovkou u výhybek č. 59 (čárkovaně) a 63 (plná čára)

Na Obr. 11. 11 je srovnání zatlačení pražce pod srdcovkou u výhybky č. 59 a 63. I zde je patrné, že výhybka č. 63 vykazuje mnohem větší zatlačení pražce. Průběh zatlačení je na obou výhybkách očekávaný, maximální zatlačení je přímo pod srdcovkou, tedy v místě největších dynamických účinků. Poněkud nečekané je větší zatlačení za hlavou pražce v odbočné větvi výhybky č. 59 oproti zatlačení za hlavou pražce v přímé. To značí špatné podepření pražce v odbočné větvi. U výhybky č. 63 je tomu dle předpokladů naopak a rozdíl v zatlačení hlavy pražce v přímé a v odbočce je podstatný. Hlava pražce v odbočné větvi výhybky nebyla při průjezdu vlaků zatížena. Rozdíl v zatlačení pražců na výhybce č. 59 a 63 je i více než 1,5 mm, což už je znatelný rozdíl.

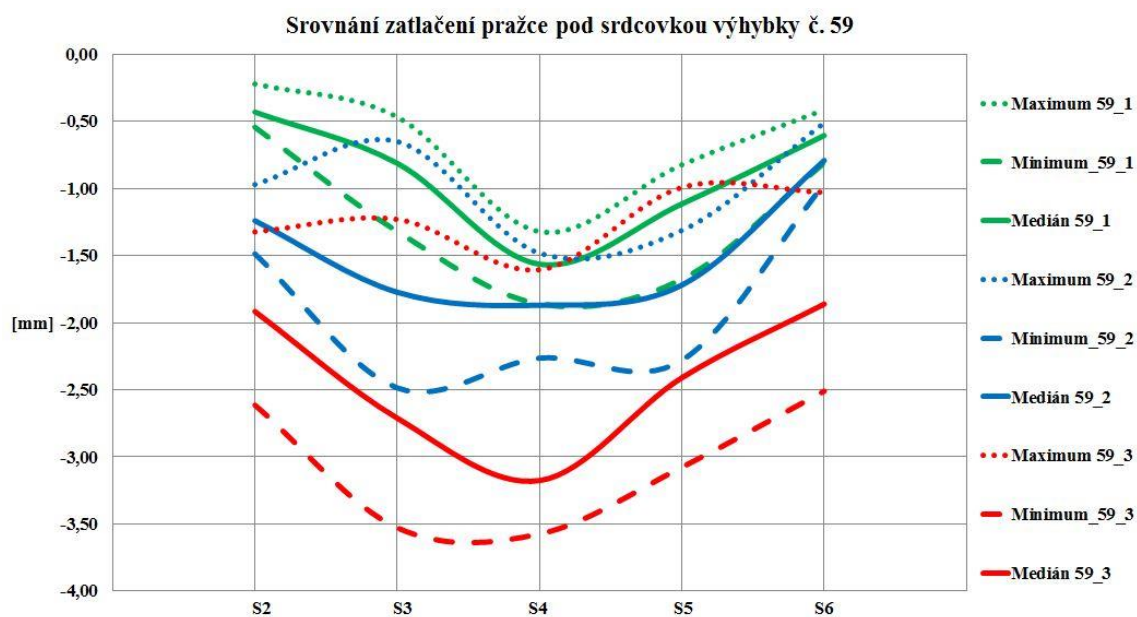
Z hlediska pohybového chování je na tom tedy výhybka č. 59 mnohem lépe, než výhybka č 63. Jak se tento rozdíl projeví na dynamických účincích, bude součástí dalšího vyhodnocení zrychlení vibrací níže. Dále se budu soustředit na porovnání jednotlivých měření na výhybce č. 59. Připomeňme, že po prvním měření byla na výhybce navařena srdcovka a po druhém měření byla srdcovka podbita.

Na Obr. 11.12 jsou grafy průběhu zatlačení pražců podél srdcovky výhybky č 59 ze všech třech měření. Jak je na grafech vidět, tak zatlačení pražců podél srdcovky se stále zvětšuje. Půl roku po podbití výhybky jsou dokonce zatlačení podstatně větší (červené křivky). Zdá se tedy, že opravný zásah podbitím ručními úderovými podbíječkami neměl ten účinek, který byl očekáván. Nejvíce se zvětšili zatlačení u snímače S4, což připisují vlivu dynamického rázu, který je v místě tohoto snímače největší.

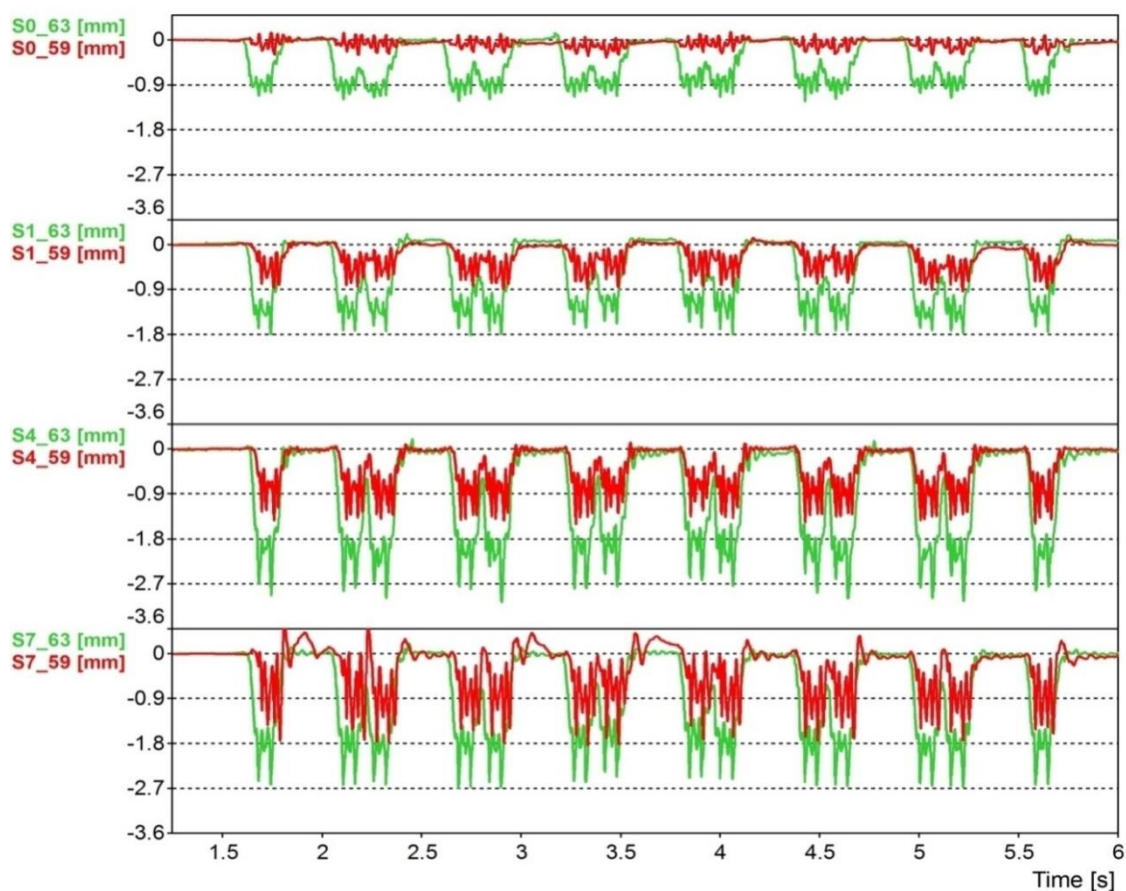


Obr. 11.12 Srovnání průhybových křivek na pražcích podél srdcovky u výhybky č. 59, zelená – první měření, modrá – druhé měření, červená – třetí měření (tečkovaně a čárkovaně jsou obalové křivky a plnou čarou je medián)

Na Obr. 11.13 jsou grafy průběhu zatlačení pražce pod srdcovkou výhybky č. 59 ze všech třech měření. Na grafech je vidět, že opravné zásahy na výhybce neměli na její pohybové chování velký vliv a zatlačení pražce se nadále zvětšuje a to na všech snímačích. Nejvíce se zatlačení zvětšilo u snímače S4, kde vznikla již plynulá průhybová křivka. Z těchto a předchozích grafů (Obr. 11.12) je zřejmé že opravné práce neměly na pohybové chování výhybky vliv. Příčinu neustále se zvyšujících zatlačení pražců lze hledat v železničním spodku i proto nemohly být opravné práce na svršku účinné. Samozřejmě pro toto tvrzení nemám jiný důkaz, než měření zatlačení pražců. Provedení kopané sondy v hlavní koleji nejvíce zatížené koridorové trati v zemi je zřejmě nereálné. Možnost, že by byla chyba v měření, je také značně nepravděpodobná, muselo by se jednat o chybu na všech snímačích a ty byly před každým měření, v jeho průběhu i po měření pečlivě kontrolovány. Uchycení snímačů bylo také několikrát kontrolováno a systém uchycení byl u všech měření stejný. Při další výměně srdcovky navrhuji provést kontrolu a případně i sanaci železničního spodku jak u výhybky č. 59, tak u výhybky č. 63.



Obr. 11.13 Srovnání průhybových křivek na pražci pod srdcovkou u výhybky č. 59, zelená – první měření, modrá – druhé měření, červená – třetí měření (tečkovaně a čárkovaně jsou obalové křivky a plnou čarou je medián)



Obr. 11.14 Porovnání zatlačení pražců podél srdcovky výhybky na jednotce řady 680 Pendolino

Pro ukázkou, že hodnoty pohybů pražců na výhybce č. 63 jsou skutečně vyšší v porovnání s výhybkou č. 59 a nejedná se o pouhé větší hodnoty maxim, jsem vybral jednotku řady 680 Pendolino. Na Obr. 11.14 je vidět porovnání pohybového chování pražců po délce srdcovky výhybky. Podobně tomu bylo u všech hodnocených vlaků. Jednotku Pendolino jsem vybral proto, že se jedná o zcela porovnatelný vlak, který jel navíc na obou konstrukcích téměř stejnou rychlostí.

11.7. Vyhodnocení zrychlení vibrací

Vyhodnocení zrychlení vibrací jsem opět rozdělil do tří částí. Vyhodnocení v časové rovině, vyhodnocení ve frekvenční rovině a vyhodnocení v časově-frekvenční rovině. Ve všech třech rovinách jsem nejprve provedl srovnání výhybky č. 59 a 63 a poté srovnání jednotlivých měření na výhybce č. 59. Pro podrobnější analýzu a srovnání jsem vybral vlaky, které bylo možné na obou konstrukcích, případně na všech měřeních, srovnat. Pokud bych prezentoval všechny grafy a tabulky, přílohy by byly příliš rozsáhlé a ztrácela by se zcela přehlednost.

11.7.1. Vyhodnocení v časové rovině

V časové oblasti jsem si nejprve ke všem snímačům zobrazil jejich časový průběh, což je vidět na vybraných vlacích v příloze k měření v Chocni. Jde o přílohu kde je zobrazen časový průběh zrychlení vibrací a jemu odpovídající frekvenční spektrum vypočtené pomocí FFT vedle sebe. Obrázky jsou uspořádány tak, že vlevo je vždy graf zrychlení vibrací a vpravo je FFT. Grafy jsou uspořádány do dvou skupin. První je roznos vibrací pražcem pod hrotem srdcovky a druhou je přechod vibrací z křídlové kolejnice do šterkového lože. Z těchto grafů jsem si pro všechny vlaky zjistil minimální a maximální hodnoty a seřadil je do přehledných tabulek, které jsou součástí příloh k měření v Chocni. Pro prezentaci v textové části disertační práce jsem z tabulek vybral hodnoty maximální, minimální a kvantily (75% - který reprezentuje u maxim přibližně průměr rychlých vlaků a u minim pomalé vlaky, 25% - který reprezentuje u minim přibližně průměr rychlých vlaků a u maxim pomalé vlaky) a dal je do přehledných tabulek.

11.7.1.1. Porovnání výhybek č. 59 a 63

V Tab. 11.1 jsou maximální hodnoty zrychlení kmitání (vibrací) na pražci pod srdcovkou a porovnání těchto hodnot mezi výhybkou č. 59 a 63. Na snímačích A1Z, A2Z a A3Z jsou hodnoty zrychlení kmitání vyšší na výhybce č. 63, zatímco na snímačích A7Z a A8Z jsou hodnoty vyšší u výhybky č. 59. Hodnoty na výhybce č. 59 jsou také rozptýleny do širšího intervalu hodnot. Tento fakt může být způsoben tím, že na výhybce č. 59 projíždělo více vlaků velmi pomalu. Pokud vezmeme v úvahu vlaky s většími dynamickými účinky (které reprezentuje kvantil 75), pak u snímače za hlavou pražce v přímé větvi výhybky (A1Z) jsou vyšší hodnoty na výhybce č. 63. To připisuji

větším pohybům pražce v tomto místě u výhybky č. 63 (Obr. 11.13). Na snímači v ose přímé větve výhybky (A2Z) jsou hodnoty zcela porovnatelné. Na snímači u srdcovky výhybky jsou vyšší hodnoty na výhybce č. 59, nicméně jde o malý rozdíl. Výrazně vyšší hodnoty na snímačích ve středu pražce odbočné větve (A7Z) a za hlavou odbočné větve (A8Z) připisují špatnému podepření pražce v těchto místech. Přestože pražec není v tomto místě tolik zatížen, protože většina vlaků jela v přímém směru, tak zatlačení pražce je zde větší jak u snímače A1Z (Obr. 11.13). To může být právě špatným podepřením pražce.

Snímač	Maximální hodnoty zrychlení vibrací [m.s-2]									
	A1Z		A2Z		A3Z		A7Z		A8Z	
Výhybka	59	63	59	63	59	63	59	63	59	63
Maximum	192	234	549	575	536	552	873	494	635	303
Kvantil 75	100	122	367	352	460	396	612	313	370	242
Medián	65	94	193	270	239	332	299	239	237	198
Kvantil 25	54	68	83	161	98	178	107	138	136	132
Minimum	15	26	31	52	33	65	63	68	18	24

Tab. 11.1 Srovnání maximálních hodnot zrychlení vibrací na pražci pod srdcovkou u výhybky č. 59 a 63

V Tab. 11.2 jsou minimální hodnoty zrychlení vibrací na pražci pod srdcovkou a porovnání těchto hodnot mezi výhybkou č. 59 a 63. Z tabulky je vidět opět větší rozptyl hodnot na výhybce č. 59, což je zřejmě dáno skladbou vlaků. Pokud porovnáme vlaky s větším dynamickým zatížením působícím na srdcovku výhybky (které v tomto případě reprezentuje kvantil 25) tak výhybka č. 59 vykazuje na všech snímačích (s výjimkou snímače A1Z vyšší hodnoty), to je nejspíše dáno větším ojetím srdcovky výhybky č. 59.

Snímač	Minimální hodnoty zrychlení vibrací [m.s-2]									
	A1Z		A2Z		A3Z		A7Z		A8Z	
Výhybka	59	63	59	63	59	63	59	63	59	63
Maximum	-23	-25	-57	-85	-65	-100	-58	-95	-21	-46
Kvantil 75	-58	-76	-163	-261	-147	-304	-106	-285	-66	-190
Medián	-68	-117	-268	-381	-306	-450	-277	-404	-164	-252
Kvantil 25	-100	-166	-580	-484	-661	-555	-560	-485	-407	-295
Minimum	-164	-208	-777	-702	-923	-863	-698	-752	-531	-375

Tab. X.2 Srovnání minimálních hodnot zrychlení vibrací na pražci pod srdcovkou u výhybky č. 59 a 63

Protože skladba vlaků na obou výhybkách nebyla úplně stejná a porovnání maxim a minim je tím trochu ovlivněno, rozhodl jsem se při porovnání pomocí ploch pod křivkou klouzavé RMS vybrat vlaky, které jsou stejné a byly změřeny na obou konstrukcích s velmi blízkou rychlostí. Jedná se rovněž o charakteristické soupravy pro obě výhybky. Vybrány byly ucelené soupravy LEO Express a Pendolino a k nim vlaky s lokomotivami (tažnými). Jedna souprava s lokomotivou řady 380 se 4 vozy a souprava Regio Jet. Níže je Tab. 11.3 s vypočítanými hodnotami ploch pod křivkou klouzavé RMS. Jak je z Tab 11.6 patrné, na většině snímačů má výhybka č. 59 vyšší hodnoty. Na hlavě pražce v přímém směru (A1Z) jsou hodnoty z obou výhybek srovnatelné, což připisují tomu, že zde není dynamický ráz ze srdcovky výhybky tak patrný. V ose přímé koleje (A2Z) jsou hodnoty také porovnatelné, až na větší hodnoty u Pendolina na výhybce č. 59. Na snímači u srdcovky jsou hodnoty přece jen o něco vyšší na výhybce č. 59 a to u tří ze čtyř vybraných vlaků asi o 15 %. Ve středu pražce v odbočné větvi výhybky (A7Z) jsou hodnoty na výhybce č. 59 vyšší asi o 20 % a za hlavou pražce v odbočné větvi výhybky (A8Z) jsou hodnoty na výhybce č. 59 vyšší o cca 35 %. Zatížení pražce je tedy přece jen větší u výhybky č. 59 a to především z důvodu špatného podepření pražce v odbočné větvi, což je patrné i z výsledků pohybového chování konstrukce výhybky č. 59.

Souprava	Výhybka	Hodnoty plochy pod křivkou klouzavé RMS [m.s ⁻¹]					Rychlost [km/h]
		A1Z	A2Z	A3Z	A7Z	A8Z	
Pendolino	59	44	99	111	117	88	163
	63	41	78	85	74	52	160
Leo Express	59	18	37	40	40	28	156
	63	18	32	35	31	18	154
Loko 380 + 4	59	32	70	79	85	67	161
	63	36	68	64	66	42	162
RegioJet	59	31	74	83	84	65	139
	63	35	77	84	77	50	133

Tab. 11.3 Srovnání ploch pod křivkou klouzavé RMS na pražci pod srdcovkou u výhybky č. 59 a 63

V Tab. 11.4 jsou maximální hodnoty zrychlení vibrací na přechodu z křídlové kolejnice do šterkového lože a porovnání těchto hodnot mezi výhybkou č. 59 a 63. Pokud vezmeme v úvahu vlaky s větším dynamickým zatížením (kvantil 75) tak uvidíme, že na všech snímačích je dosaženo vyšších hodnot u výhybky č. 59, tuto skutečnost přisuzují většímu ojetí srdcovky výhybky, kdy se špičkové hodnoty přenášejí až do šterkového lože. Největší rozdíl je právě ve šterkovém loži, kde jsou hodnoty na výhybce č. 59 více než dvojnásobné. To je pravděpodobně způsobeno i tím, že u výhybky č. 63 pražec již zcela nedosedá na šterkovou lavičku, protože zatlačení pražce jsou zde již velké. Proto se přenáší do šterkového lože méně špičkových hodnot.

	Maximální hodnoty zrychlení vibrací [m.s-2]									
Snímač	A0Z		A3Z		A4Z		A5X		A6Y	
Výhybka	59	63	59	63	59	63	59	63	59	63
Maximum	228	107	536	552	1125	1282	577	218	684	414
Kvantil 75	171	69	460	396	983	705	210	137	330	249
Medián	73	52	239	332	717	654	104	105	191	188
Kvantil 25	32	26	98	178	331	408	72	82	98	124
Minimum	14	3	33	65	193	147	31	19	53	75

Tab. 11.4 Srovnání maximálních hodnot zrychlení vibrací na přechodu z křídlové kolejnice do šterkového lože u výhybky č. 59 a 63

V Tab. 11.5 jsou minimální hodnoty zrychlení vibrací na přechodu z křídlové kolejnice do šterkového lože a porovnání těchto hodnot mezi výhybkou č. 59 a 63. Jak již bylo popsáno výše, vzhledem ke skladbě vlaků budu porovnávat hlavně na základě kvantilu 25. I zde stejně jako u maxim jsou na všech snímačích vyšší hodnoty na výhybce č. 59. Největší je rozdíl opět ve šterkovém loži. Nejvyšších hodnot bylo dosaženo na křídlové kolejnici ve svislém směru, což se dalo očekávat. Trochu překvapivé je, že hodnoty ve šterkovém loži (A0Z) jsou téměř srovnatelné s hodnotami na křídlové kolejnici v příčném (A6Y) a podélném směru (A5X). Hodnoty na pražci (A3Z) jsou dokonce vyšší než hodnoty na křídlové kolejnici v příčném (A6Y) a podélném směru. Svědčí to o velkém zatížení pražce a šterkového lože. Dynamické zatížení pražce a šterkového lože je několikanásobně vyšší, než je tomu v případě měření v Poříčanech.

	Minimální hodnoty zrychlení vibrací [m.s-2]									
Snímač	A0Z		A3Z		A4Z		A5X		A6Y	
Výhybka	59	63	59	63	59	63	59	63	59	63
Maximum	-29	-2	-65	-100	-305	-222	-27	-30	-62	-87
Kvantil 75	-61	-29	-147	-304	-433	-651	-67	-91	-108	-154
Medián	-170	-84	-306	-450	-804	-813	-97	-113	-177	-210
Kvantil 25	-326	-131	-661	-555	-1092	-974	-271	-158	-280	-244
Minimum	-525	-248	-923	-863	-1548	-1302	-468	-268	-403	-314

Tab. 11.5 Srovnání minimálních hodnot zrychlení vibrací na přechodu z křídlové kolejnice do šterkového lože u výhybky č. 59 a 63

Stejně jako u pražce i na přechodu z křídlové kolejnice do šterkového lože byly pro analýzu klouzavou RMS vybrány stejné vlaky. Níže je Tab. 11.6 s vypočítanými hodnotami ploch pod křivkou klouzavé RMS. Jak je z Tab 11.6 patrné, na všech snímačích a u všech vlaků má výhybka č. 59 vyšší hodnoty (až na jednu hodnotu na pražci). Na křídlové kolejnici v příčném směru (A6Y) je to o 20%, v podélném směru (A5X) je to o více jak 15 % a ve svislém směru (A4Z) je to o 25 %. Na pražci (A3Z)

jsou hodnoty vyšší průměrně o více jak 15 % a ve štěrkovém loži (A0Z) jsou hodnoty 4 x vyšší! Je však třeba mít na paměti, že výhybka č. 63 má mnohem výraznější zatlačení pražců. V místě, kde je zatlačena tyč do štěrkového lože se snímačem možná ani už pražec zcela nedosedá na štěrkovou lavičku, proto se v tomto místě možná přenáší mnohem méně vibrací do štěrkového lože. Této děj byl pozorován i při měření v Moravanech, které je zmíněno v kapitole 2. Na pražci jsou dynamické účinky na výhybce č. 59 vyšší o 15 %. Na křídlové kolejnici je vidět vliv většího ojetí srdcovky u výhybky č. 59 a dynamické účinky jsou na této konstrukci větší.

Souprava	Výhybka	Hodnoty plochy pod křivkou klouzavé RMS [m.s^{-1}]					Rychlost [km/h]
		A0Z	A3Z	A4Z	A5X	A6Y	
Pendolino	59	39	111	381	90	125	163
	63	10	85	270	53	93	160
Leo Express	59	11	40	180	37	57	156
	63	2	35	136	28	46	154
Loko 380 + 4	59	28	79	250	61	87	161
	63	6	64	198	41	72	162
Regio Jet	59	25	83	259	51	82	139
	63	6	84	201	39	71	133

	ve svislém směru
	v podélném směru
	v příčném směru

Tab. 11.6 Srovnání ploch pod křivkou klouzavé RMS na přechodu z křídlové kolejnice do štěrkového lože u výhybky č. 59 a 63

Z provedeného srovnání je zřejmé, že ojetí srdcovky se projevuje zvýšením zrychlení kmitání na konstrukci a lze tedy říci, že dynamické účinky se zvyšují. Rozdíl mezi konstrukcemi by byl možná ještě mnohem větší, ale snižuje ho zřejmě větší zatlačení pražců u výhybky č. 63. Přestože je zatlačení pražců u výhybky č. 63 mnohem větší, zrychlení vibrací na pražci jsou vyšší u výhybky č. 59, to připisují tomu, že srdcovka na výhybce č. 63 je relativně nová a do budoucna lze očekávat i zde rychlejší zhoršování stavu. Od traťmistra bylo zjištěno, že výhybka č. 63 byla před výměnou srdcovky každý rok navařována, to připisují právě velkému zatlačení pražců. Pro srovnání výhybek to nebyla úplně šťastná volba, ale při osobní prohlídce vypadala výhybka v pořádku a informace o navařování srdcovky se k nám dostala bohužel až po měření.

11.7.1.2. Porovnání měření na výhybce č. 59

Na výhybce č. 59 byly provedeny tři měření, po prvním měření byla srdcovka výhybky opravena navařením a půl roku před třetím měřením byla srdcovka výhybky podbita. V Tab. 11.7 jsou maximální hodnoty a v Tab. 11.8 jsou minimální hodnoty zrychlení vibrací na pražci pod srdcovkou pro všechna tři měření. Na těchto špičkových hodnotách je vidět, že opravné zásahy neměly na výhybku příliš velký účinek a hodnoty

se prakticky na všech čidlech v průběhu času zvyšují. Dochází tak k velmi podobnému jevu jako u zatlačení pražců. I přes opravné zásahy se dynamické účinky nedaří výrazně snížit, nebo změnit trend jejich nárůstu. Je tedy vidět, že horší podepření pražce zvyšuje i špičkové hodnoty zrychlení vibrací na pražci.

Snímač	Maximální hodnoty zrychlení vibrací [m.s ⁻²]														
	A1Z			A2Z			A3Z			A7Z			A8Z		
Měření	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Maximum	192	178	327	549	777	1167	536	601	873	873	594	1164	635	408	1160
Kvantil 75	100	130	199	367	435	645	460	417	716	612	421	739	370	322	641
Medián	65	93	108	193	275	326	239	291	433	299	339	339	237	284	509
Kvantil 25	54	58	61	83	207	228	98	229	245	107	275	183	136	240	416
Minimum	15	7	12	31	33	43	33	41	56	63	53	7	18	28	87

Tab. 11.7 Srovnání maximálních hodnot zrychlení vibrací na pražci pod srdcovkou u výhybky č. 59

Snímač	Minimální hodnoty zrychlení vibrací [m.s ⁻²]														
	A1Z			A2Z			A3Z			A7Z			A8Z		
Měření	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Maximum	-23	-21	-16	-57	-43	-67	-65	-61	-60	-58	-54	-51	-21	-26	-46
Kvantil 75	-58	-73	-90	-163	-201	-223	-147	-216	-271	-106	-213	-247	-66	-216	-232
Medián	-68	-98	-131	-268	-371	-424	-306	-359	-536	-277	-331	-370	-164	-274	-323
Kvantil 25	-100	-123	-155	-580	-485	-737	-661	-568	-919	-560	-448	-712	-407	-307	-524
Minimum	-164	-189	-240	-777	-724	-1196	-923	-865	-1365	-698	-636	-1090	-531	-390	-773

Tab. 11.8 Srovnání minimálních hodnot zrychlení vibrací na pražci pod srdcovkou u výhybky č. 59

Pro další porovnání jsem vybral ze signálů časové úseky odpovídající průjezdu lokomotiv. Lokomotivy jsem vybral z několika důvodů, především jsou zcela srovnatelné, rozdíly mezi lokomotivami stejné řady jsou minimální a na vyhodnocení nemají vliv. Lokomotivy jsou oproti běžným vozům i lépe udržované a nemají imperfekce na pojížděné ploše kol. V neposlední řadě lokomotivy vyvozují největší dynamické účinky na srdcovky výhybky, protože jejich hmotnost na nápravu je výrazně vyšší jako u ucelených jednotek, nebo osobních vozů. Lokomotivy také nejsou ovlivněny obsazeností soupravy, jako je to u ucelených jednotek, v lokomotivě jede vždy jen strojvedoucí. Ze všech tří měření jsem vybral 4 lokomotivy, u kterých jsem spočítal plochu pod křivkou klouzavé RMS. Výběr lokomotiv nebyl jednoduchý, protože při třetím měření začali jezdit jiné soupravy vlaků Railjet, které nahradily původní soupravy. Snaha byla, aby se jednalo o stejný typ lokomotivy u všech měření, která navíc jela přibližně stejnou rychlostí u všech měření. Dalším požadavkem bylo, aby lokomotivy jely rychlostí alespoň 120 km·h⁻¹ nebo vyšší. Do porovnání jsem vybral dvě lokomotivy řady 380, jednu lokomotivu řady 162 a jednu lokomotivu řady 151.

Níže v Tab. 11.9 jsou hodnoty plochy pod křivkou klouzavé RMS pro snímače na pražci. Ve sloupcích jsou pro jednotlivé snímače vedle sebe 1. až 3. měření. Červenou

barvou jsou vyznačeny nejvyšší hodnoty, žlutou barvou druhé nejvyšší a zelenou barvou nejnižší hodnoty. Z Tab. 11.9 je vidět, že oprava navařením srdcovky, která byla provedena před druhým měřením, se na pražci pozitivně projevila v mírném snížení hodnot oproti prvnímu měření. Na třetím měření je však vidět, že hodnoty výrazně vzrostly i přes další opravný zásah podbitím srdcovky. Z vyhodnocení zatlačení pražců je zřejmé, že se výrazně zvýšily při třetím měření. Pražec je tak evidentně špatně podepřen a to se projevuje i zde na zvýšení hodnot.

Snímač	RMS hodnoty zrychlení vibrací [m.s ⁻¹]														
	A1Z			A2Z			A3Z			A7Z			A8Z		
Měření	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
loko 380	5,9	6,1	9,2	14,5	20,2	30,7	17,6	19,0	32,4	19,5	18,2	31,9	13,9	14,8	32,4
loko 380	13,5	5,3	11,6	32,7	15,5	33,3	36,4	17,8	32,6	37,1	19,2	35,7	24,0	14,3	28,6
loko 162	6,9	8,4	13,6	14,0	16,0	32,0	16,1	17,7	33,4	17,3	19,5	35,1	12,5	19,5	29,1
loko 151	4,1	4,5	8,6	12,9	12,3	21,7	14,4	14,3	23,8	14,1	14,7	26,5	10,4	13,3	23,2
průměr	7,6	6,1	10,7	18,5	16,0	29,4	21,1	17,2	30,6	22,0	17,9	32,3	15,2	15,5	28,3

Tab. 11.9 Srovnání ploch pod křivkou klouzavé RMS na pražci pod srdcovkou u výhybky č. 59

V Tab. 11.10 jsou maximální hodnoty a v Tab. 11.11 minimální hodnoty zrychlení vibrací pro přechod z křídlové kolejnice do šterkového lože pro všechna tři měření. Když se podíváme na špičkové hodnoty ve výše zmíněných tabulkách, tak je vidět, že hodnoty se stále zvyšují a opravné práce tedy neměly příliš velkou efektivitu. Nejvyšších hodnot dosahuje svislý směr na křídlové kolejnici (A4Z) a také hodnoty na pražci (A3Z). Zajímavý je ale nárůst v podélném směru na křídlové kolejnici (A5X). Tyto špičkové hodnoty pravděpodobně signalizují zhoršující se stav podepření výhybky a tím zhroucení geometrie přechodu.

Snímač	Maximální hodnoty zrychlení vibrací [m.s ⁻²]														
	A0Z			A3Z			A4Z			A5X			A6Y		
Měření	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Maximum	228	235	255	536	601	873	1125	1273	1768	577	202	768	684	404	708
Kvantil 75	171	185	177	460	417	716	983	989	1351	210	156	447	330	284	417
Medián	73	157	118	239	291	433	717	831	794	104	124	289	191	243	273
Kvantil 25	32	94	62	98	229	245	331	625	567	72	96	183	98	159	197
Minimum	14	15	4	33	41	56	193	155	296	31	5	47	53	77	83

Tab. 11.10 Srovnání maximálních hodnot zrychlení vibrací na přechodu z křídlové kolejnice do šterkového lože u výhybky č. 59

Snímač	Minimální hodnoty zrychlení vibrací [m.s ⁻²]														
	A0Z			A3Z			A4Z			A5X			A6Y		
Měření	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Maximum	-29	-31	-4	-65	-61	-60	-305	-337	-188	-27	-26	-63	-62	-94	-89
Kvantil 75	-61	-174	-73	-147	-216	-271	-433	-642	-748	-67	-93	-200	-108	-176	-178
Medián	-170	-253	-125	-306	-359	-536	-804	-818	-979	-97	-122	-275	-177	-344	-323
Kvantil 25	-326	-346	-275	-661	-568	-919	-1092	-1297	-1452	-271	-163	-601	-280	-366	-450
Minimum	-525	-391	-419	-923	-865	-1365	-1548	-7363	-1667	-468	-354	-1135	-403	-457	-653

Tab. 11.11 Srovnání minimálních hodnot zrychlení vibrací na přechodu z křídlové kolejnice do šterkového lože u výhybky č. 59

Do dalšího porovnání jsem vybral opět časové výřezy lokomotiv, stejně jako u porovnání na pražci. V Tab. 11.12 jsou hodnoty plochy pod křivkou klouzavé RMS pro snímače na přechodu z křídlové kolejnice do šterkového lože. Ve sloupcích jsou pro jednotlivé snímače vedle sebe 1. až 3. měření. Červenou barvou jsou vyznačeny nejvyšší hodnoty, žlutou barvou druhé nejvyšší a zelenou barvou nejnižší hodnoty. Z Tab. 11.12 je vidět že na všech snímačích, kromě šterkového lože, je dosaženo nejvyšších hodnot u třetího měření. Na křídlové kolejnici je vidět účinek opravného zásahu navařením srdcovky před druhým měřením (A4Z, A5X a A6Y). Hodnoty jsou sice po navaření srdcovky mírně vyšší, ale vzhledem k větším zatlačení pražce to není velký rozdíl, v podélném směru (A5X) dokonce došlo k mírnému zlepšení. Tuto skutečnost připisují zlepšené geometrii přechodu, což je vidět na grafech přesné nivelaci (Obr. 11.8). Na třetím měření je již vlivem velkých zatlačení pražce vidět, že hodnoty znatelně narostly, nejvíce v podélném směru (A5X) skoro o 50 %. Lze s největší pravděpodobností říci, že je to znak zhroucení geometrie přechodu, kdy se větší část dynamické energie přenesla do podélného směru. Na pražci (A3Z) je vidět pozitivní vliv opravného zásahu navařením srdcovky, kdy došlo ke snížení dynamického namáhání. Ovšem na posledním měření je vidět, že i zde jsou hodnoty výrazně nejvyšší, což lze opět přičíst špatnému podepření pražce. Ve šterkovém loži (A0Z) je vidět, že došlo k mírnému snížení hodnot při třetím měření, tuto skutečnost připisují tomu, že pražec je špatně podepřen a v místě snímače ani nedosedá na šterkové lože, takže se do něj přenesla méně dynamické energie.

Snímač	RMS hodnoty zrychlení vibrací [m.s ⁻¹]														
	A0Z			A3Z			A4Z			A5X			A6Y		
Měření	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
loko 380	7,1	8,8	6,4	17,6	19,0	32,4	50,1	64,1	77,0	13,6	15,0	24,8	17,3	19,9	32,2
loko 380	11,4	7,8	7,5	36,4	17,8	32,6	112,5	67,5	80,3	20,5	11,2	27,4	34,1	22,3	34,5
loko 162	6,3	8,2	6,4	16,1	17,7	33,4	52,3	74,1	103,7	10,5	14,2	31,4	18,1	24,5	42,8
loko 151	4,3	5,2	5,6	14,4	14,3	23,8	39,3	53,3	51,7	6,9	8,9	11,4	11,8	18,1	20,2
průměr	7,2	7,5	6,5	21,1	17,2	30,6	63,6	64,8	78,2	12,9	12,3	23,7	20,3	21,2	32,4

Tab. 11.12 Srovnání ploch pod křivkou klouzavé RMS na přechodu z křídlové kolejnice do šterkového lože u výhybky č. 59

Z časového vyhodnocení výsledků měření lze konstatovat, že opravný zásah navařením srdcovky se na křídlové kolejnici a pražci projevil pozitivně, nicméně zřejmě vlivem špatného podloží se hodnoty zrychlení vibrací zvyšují. Na křídlové kolejnici v podélném směru (A5X) lze vypočítat zhroucení geometrie přechodu na výrazně vyšších hodnotách zrychlení vibrací. Ve šterkovém loži došlo sice ke snížení hodnot zrychlení vibrací, ale souvisí to pravděpodobně se špatným podepřením pražce a s tím, že pražec zcela nedosedá na šterkovou lavičku.

11.7.2. Vyhodnocení ve frekvenční rovině

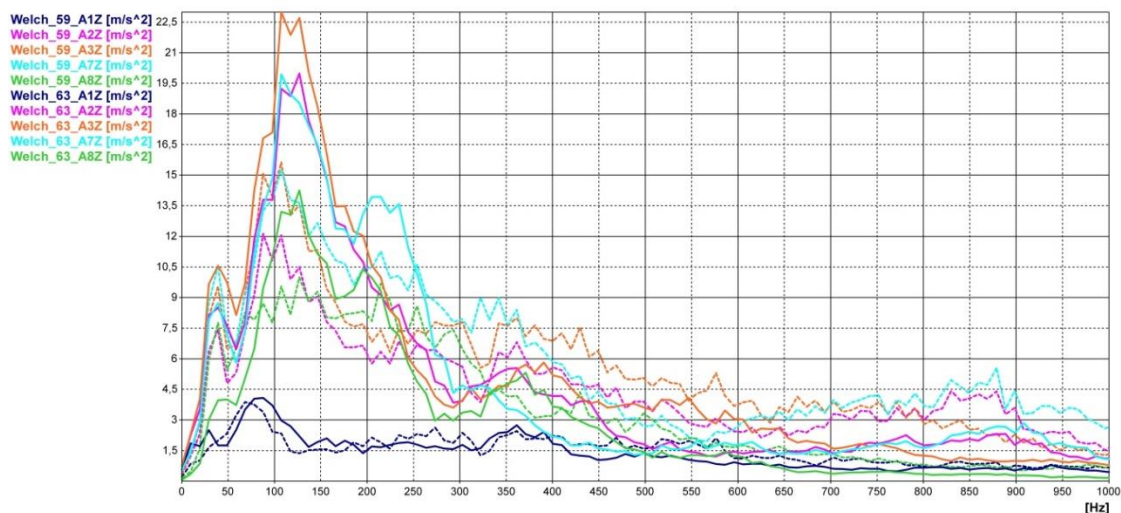
Ve frekvenční oblasti jsem se nejprve zaměřil na analýzu přehledných grafů, které jsou na vybraných vlcích součástí přílohy měření v Chocni. Grafy jsou zobrazeny pro typické vlaky. Pro první náhled a zhodnocení jsou ideální. Obrázky v příloze měření v Chocni jsou vždy uspořádány tak, že vlevo je časový průběh zrychlení vibrací a vpravo je z časového průběhu vypočítané frekvenční spektrum pomocí FFT. Pokud se podíváme na tyto přehledné grafy, tak na první pohled je vidět, že na pražci je nejvýraznější frekvence okolo 100 Hz a dále také frekvence mezi 20 Hz – 50 Hz. Na křídlové kolejnici je frekvenční pásmo složitější. Výrazné jsou frekvence okolo 50 Hz, poté mezi 100 – 200 Hz, poté široké pásmo okolo 400 Hz a široké pásmo okolo 600 Hz. Ve šterkovém loži jsou významné frekvenční složky mezi 20 – 50 Hz a poté okolo 100 Hz, další frekvence se objevují již méně (například vrchol okolo 300 Hz). Opět se ukazuje, že se zvyšující se rychlostí se frekvenční složky posouvají směrem k vyšším frekvencím.

11.7.2.1. Vyhodnocení ve frekvenční oblasti – Welchova metoda

Pro podrobné srovnání ve frekvenční rovině jsem u všech měření vybral časové výřezy, které odpovídají průjezdu lokomotivy. Jedná se o stejné 4 lokomotivy, které jsem využil již při klouzavé RMS. Na každé lokomotivě jsem spočítal frekvenční spektrum Welchovou metodou a to u všech snímačů (získal jsem tak 9 frekvenčních spekter pro každou lokomotivu a 4 x 9 frekvenčních spekter pro každé měření). Poté jsem pro každé měření sečetl frekvenční spektra 4 lokomotiv z odpovídajících si signálů a udělal z nich jedno průměrné frekvenční spektrum (dostal jsem tak pro každé měření 9 spekter). Tyto spektra jsem poté sestavil do grafů. V dalším textu se budu nejdříve věnovat srovnání výhybky č. 59 a 63 a poté se zaměřím na srovnání jednotlivých měření na výhybce č. 59. Všechny popisované grafy jsou uvedeny i v přílohách měření v Chocni, kde jsou vyobrazeny přehledně na celou stranu.

Na Obr. 11.14 jsou grafy na snímačích na pražci. Plnou čarou jsou značeny frekvenční spektra na výhybce č. 63 a čárkovanou čarou jsou spektra na výhybce č. 59. Modrou barvou jsou spektra pro snímač A1Z (za hlavou pražce v přímé větvi výhybky), fialovou pro snímač A2Z (v ose přímé větve výhybky), oranžovou je snímač A3Z (u srdcovky), tyrkysovou je snímač A7Z (v ose odbočné větve) a zelenou je snímač A8Z (za hlavou

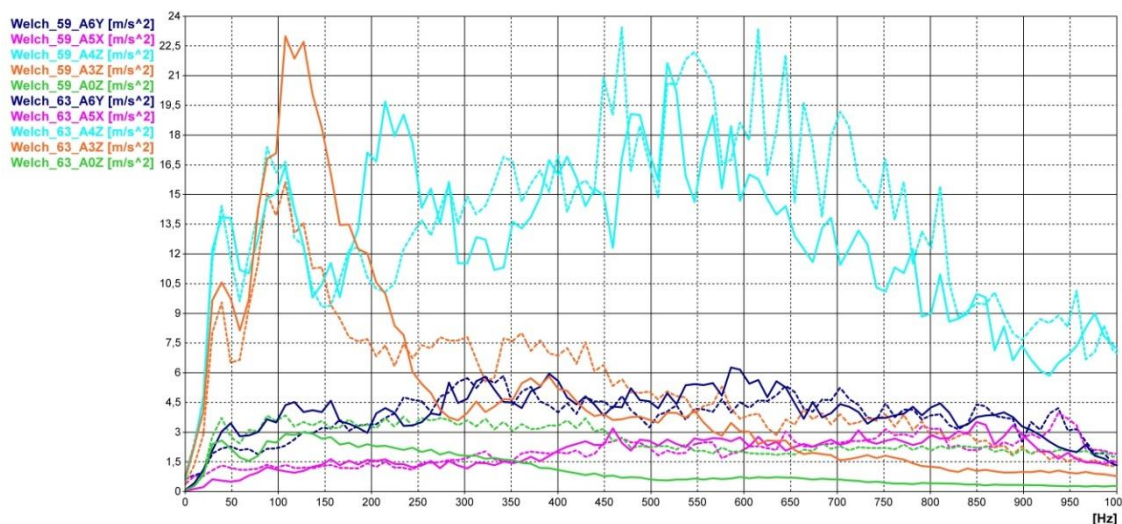
pražce v odbočné větvi výhybky). Při první pohledu na graf je jasné, že větších hodnot nabývají spektra na výhybce č. 63. Průběhy jsou velmi podobné na všech snímačích kromě snímače A1Z. Ten vykazuje mnohem menší hodnoty na obou výhybkách. Vysvětlením může být fakt, že hlava pražce v přímé větvi je zatížena druhým kolem, proto pražec nemůže v tomto místě tolik kmitat. První výrazný frekvenční vrchol je v oblasti 40 Hz, další a nejvýznamnější je u výhybky č. 63 okolo 120 Hz a u výhybky č. 59 okolo 100 Hz. Tyto frekvenční vrcholy by mohly odpovídat složkám dynamické síly P_2 (popsané v teoretickém rozboru problematiky). Ta je zodpovědná právě za ohybové namáhání křídlové kolejnice a proto se přenáší až na pražec. U výhybky č. 63 jsou jak na 40 Hz, tak i na 120 Hz nejvyšší hodnoty u snímače přímo u srdcovky (A3Z), za nimi pak následují snímače ve středech pražců (A2Z a A7Z). Tato skutečnost se jeví logická, když si uvědomíme, že snímač A3Z je dynamickému rázu nejbližší a poté následují snímače A2Z a A7Z ve středech pražců, kam se dynamický ráz šíří. Dynamický ráz se dobře šíří i do hlavy pražce v odbočné větvi výhybky, to přičítám tomu, že odbočná větev není zatížena a ráz se může na tuto stranu lépe šířit. Na výhybce č. 59 jsou klíčové frekvenční složky také na 40 Hz a na 100 Hz, jinak jsou tvary křivek velmi podobné jako u výhybky č. 63. Na klíčové frekvenci okolo 100 Hz (120 Hz na výhybce č. 63) jsou hodnoty na výhybce č. 59 o třetinu nižší. Dynamická síla P_2 , která se do pražce přenáší, je tedy vyšší na výhybce č. 63. Je tomu tak proto, že se při větším zatlačení pražců zhroutí geometrie přechodu z křídlové kolejnice na hrot srdcovky a tím se zvýší dynamické účinky působící na srdcovku výhybky. Schematicky je tato skutečnost patrná z Obr. 2.9. Další zajímavou skutečností je, že snímače v odbočné větvi výhybky (A7Z a A8Z) mají další výrazný frekvenční vrchol okolo 200 Hz, respektive mezi 200 Hz a 250 Hz. Tento fakt připisuji tomu, že pražec není v odbočné větvi zatížen a zřejmě ani plně nedosedá na šterkovou lavičku, může tak lépe kmitat a přenáší se jím i vyšší frekvenční složky. Tyto vyšší frekvenční složky již mohou odpovídat zrychlením, které vyvolává dynamická síla P_1 . Zajímavé také je, že grafy za hlavou pražce v přímé větvi výhybky jsou u obou konstrukcí velmi podobné a na výhybce č. 63 nevykazují výrazně vyšší hodnoty, spíše se dá říct, že jsou obě konstrukce v tomto místě porovnatelné. Maximum v amplitudovém spektru je na výhybce č. 63 na cca 80 Hz a u výhybky č. 59 na cca 70 Hz, kopíruje tedy frekvenční posun křivek A3Z, A7Z a A2Z směrem k nižším frekvencím u výhybky č. 59. Tento fakt by bylo možné využít při diagnostice výhybek, kdy při zvětšujícím se rozdílu mezi signálem A1Z (na hodnotě zrychlení kmitání okolo 100 Hz na A3Z a na hodnotě okolo 75 Hz na A1Z) se velmi pravděpodobně zvětšuje i dynamická síla P_2 , což znamená zhroucení geometrie přechodu a pravděpodobně i zvětšující se zatlačení pražce pod srdcovkou.



Obr. 11.14 Welchova metoda, pražec pod srdcovkou, srovnání výhybky č. 59 (čárkovaně) a 63 (plná čára)

Na dalším Obr. 11.15 je vidět frekvenční spektrum na přechodu z křídlové kolejnic do šterkového lože. Plnou čarou jsou značeny frekvenční spektra na výhybce č. 63 a čárkovanou čarou jsou spektra na výhybce č. 59. Modrou barvou jsou spektra pro snímač A6Y (na křídlové kolejnici v příčném směru), fialovou pro snímač A5X (na křídlové kolejnici v podélném směru), oranžovou je snímač A3Z (u srdcovky na pražci), tyrkysovou je snímač A4Z (na křídlové kolejnici ve svislém směru) a zelenou je snímač A0Z (na tyči ve šterkovém loži). Snímače ve svislém směru (A4Z, A3Z a A0Z) mají velmi podobný průběh a to až do cca 150 Hz. U výhybky č. 63 jsou na snímači A4Z nejvýznamnější frekvence 40 Hz, 110 Hz, frekvenční pásmo mezi 200 Hz až 250 Hz, frekvence okolo 400 Hz a frekvenční pásmo mezi 450 Hz až 600 Hz. Nejvyšších hodnot dosahují frekvenční pásma mezi 200 Hz až 250 Hz a 450 Hz až 600 Hz. Zejména pásmo frekvencí mezi 200 Hz a 250 Hz a frekvence okolo 400 Hz pravděpodobně odpovídají zrychlením, které vyvolává dynamická síla P_1 . Síla P_1 je zodpovědná za kontaktní napětí na hrotu srdcovky. Frekvenční špičky okolo 40 Hz a 110 Hz budou s velkou pravděpodobností odpovídat zrychlením kmitání, které vyvolává dynamická síla P_2 a přenáší se i na pražec a do šterkového lože. Právě zrychlení vibrací, které zřejmě odpovídají síle P_2 , vyvolávají frekvenční vrchol na pražci okolo 120 Hz (100 Hz na výhybce č. 59), kdy je dokonce u výhybky č. 63 výrazně vyšší než na kolejnici. To může být způsobeno velkými poklesy pražce pod zatížením. Právě na pražci v oblasti frekvencí mezi 100 – 130 Hz je mezi oběma výhybkami největší rozdíl, což značí, že pohyby pražce se projevily právě na těchto frekvenčních složkách. Na kolejnici ve svislém směru jsou průběhy z obou konstrukcí srovnatelné až do frekvence 175 Hz, poté má výhybka č. 63 významnou frekvenční oblast mezi 200 – 250 Hz, zatímco výhybka č. 59 má výraznější frekvenční vrchol až okolo 350 Hz. Je to zřejmě i tím, že kvůli rozpadu geometrie přechodu u výhybky č. 63 je složka síly P_1 v této oblasti frekvencí výraznější. V oblasti frekvencí nad 450 Hz nabývá frekvenční spektrum

u výhybky č. 59 vyšší hodnot a má zde i více špiček, to je může být způsobeno i imperfekcí na hrotu srdcovky. Ve šterkovém loži má výhybka č. 59 vyšší hodnoty prakticky v celém frekvenčním pásmu. Má také výraznější frekvenční vrchol okolo 40 Hz. To může být dáno i tím, že pražec výhybky č. 63 plně nedosedá na šterkovou lavičku.

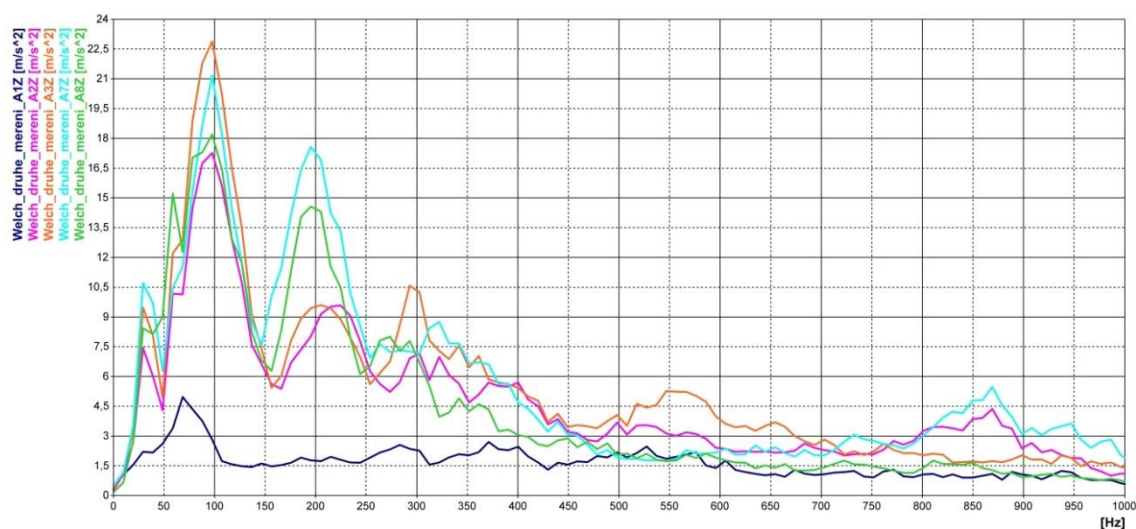


Obr. 11.15 Welchova metoda, přechod z křídlové kolejnice do šterkového lože, srovnání výhybky č. 59 (čárkované) a 63 (plná čára)

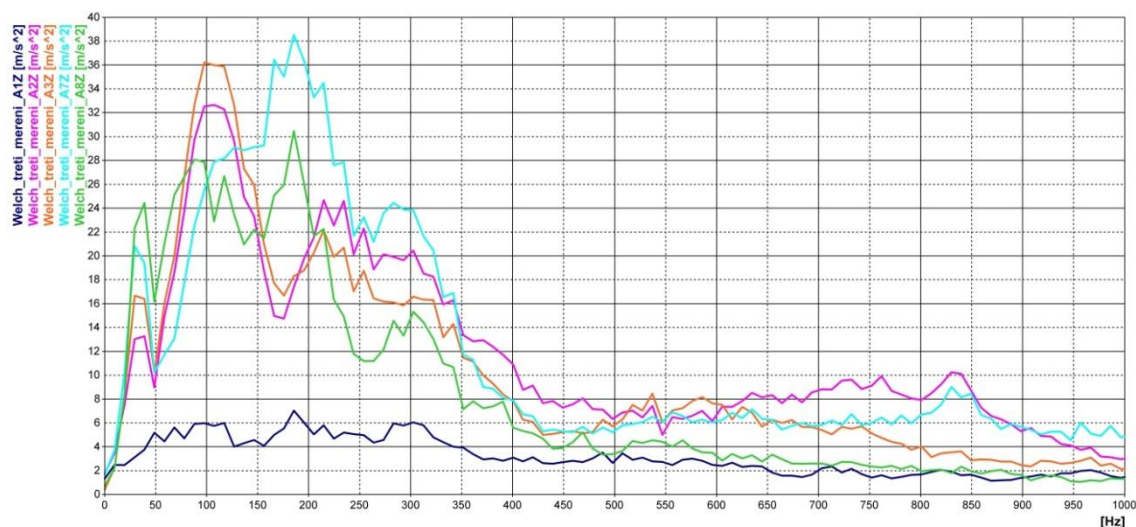
Další grafy byly sestaveny pro srovnání jednotlivých měření na výhybce č. 59. První měření je již v grafech výše. Na Obr. 11.16 jsou zobrazena frekvenční spektra získaná ze snímačů na pražci pod srdcovkou po druhém měření, tedy po opravě srdcovky navařením srdcovky. Modrou barvou jsou spektra pro snímač A1Z (za hlavou pražce v přímé větvi výhybky), fialovou pro snímač A2Z (v ose přímé větve výhybky), oranžovou je snímač A3Z (u srdcovky), tyrkysovou je snímač A7Z (v ose odbočné větve) a zelenou je snímač A8Z (za hlavou pražce v odbočné větvi výhybky). Na grafech je vidět, že především v oblasti frekvencí okolo 100 Hz, tedy v oblasti frekvencí, jejichž zrychlení kmitání pravděpodobně odpovídá síle P_2 došlo k znatelnému nárůstu hodnot. Tento fakt připisují tomu, že ve druhém měření se zvětšily zatlačení pražců. Největších hodnot bylo dosaženo na pražci přímo u srdcovky (snímač A3Z). Velký rozdíl je však i ve frekvenčním pásmu okolo 200 Hz a 300 Hz. Tuto skutečnost připisují navaření srdcovky, kdy se změnila kontaktní geometrie v srdcovce výhybky, a zvýšily se zrychlení vibrací na frekvencích, jež odpovídají síle P_1 . Navařením srdcovky se tedy zřejmě nepodařilo docílit snížení dynamického namáhání na přechodu kola z křídlové kolejnice na hrot srdcovky. To se projevilo i na pražcích.

Na dalším grafu na Obr. 11.17 je srovnání frekvenčních spekter na pražci pod srdcovkou u třetího měření. Zde je oproti druhému měření vidět další, ještě výraznější

nárůst zrychlení kmitání na frekvenci okolo 100 Hz, které pravděpodobně odpovídají síle P_2 , což odpovídá dalšímu zvětšení zatlačení pražců. Opět jsou největší hodnoty na pražci přímo u srdcovky (snímač A3Z). Nárůst zrychlení kmitání je i v oblasti frekvencí, které jsou pravděpodobně průvodním jevem síly P_1 , tedy na frekvencích 160 – 250 Hz a okolo 300 Hz. Je vidět, že celkově se dynamické účinky na pražci zvětšují a to i přes opravné zásahy, které neměly bohužel velký vliv na dynamické namáhání výhybky.



Obr. 11.16 Welchova metoda, na pražci pod srdcovkou, druhé měření na výhybce č. 59

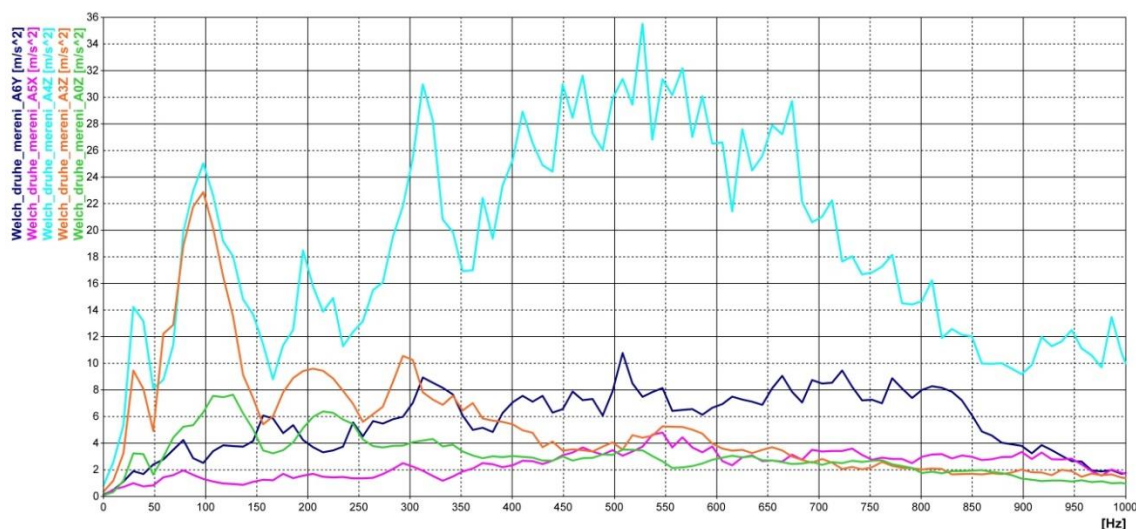


Obr. 11.17 Welchova metoda, na pražci pod srdcovkou, třetí měření na výhybce č. 59

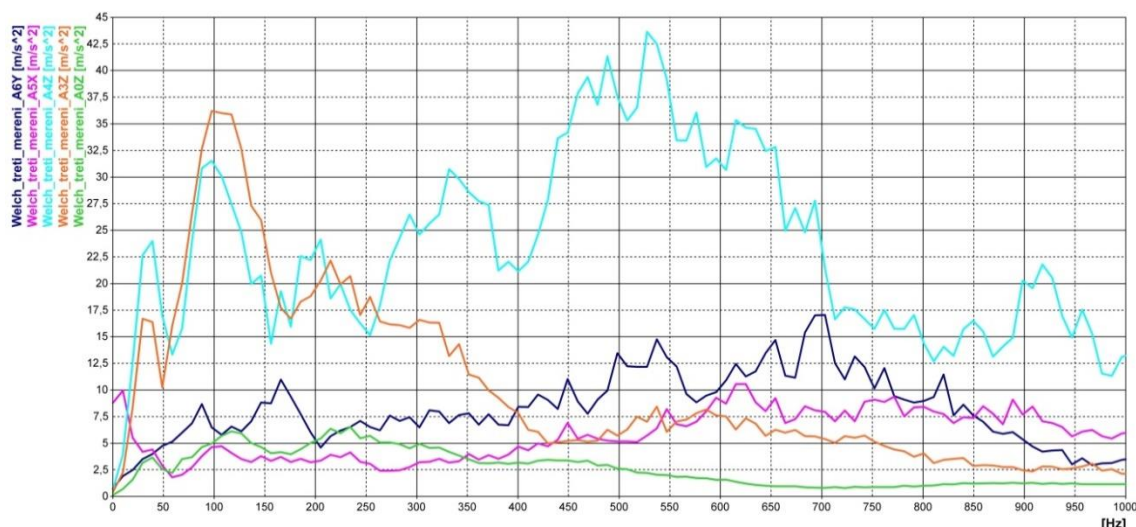
Na dalších grafech je zobrazena změna dynamických účinků na přechodu z křídlové kolejnice do šterkového lože. Modrou barvou jsou spektra pro snímač A6Y (na křídlové kolejnici v příčném směru), fialovou pro snímač A5X (na křídlové kolejnici v podélném

směru), oranžovou je snímač A3Z (u srdcovky na pražci), tyrkysovou je snímač A4Z (na křídlové kolejnici ve svislém směru) a zelenou je snímač A0Z (na tyči ve šterkovém loži). Na Obr. 11.18 jsou frekvenční spektra z druhého měření na výhybce č. 59. Z grafů je vidět, že především v oblasti frekvencí okolo 100 Hz na pražci u srdcovky (A3Z) a na křídlové kolejnici ve svislém směru (A4Z), došlo k nárůstu hodnot. Souvisí to s větším zatlačením pražce. Na křídlové kolejnici ve svislém směru (A4Z) se zvýšily hodnoty zrychlení kmitání především v oblasti frekvencí zodpovědných za dynamickou sílu P_1 , tedy na 200 Hz, na 300 – 350 Hz, ale také v oblasti frekvencí 400 – 600 Hz. Vyšší hodnoty zrychlení kmitání jsou i ve šterkovém loži a to především v oblasti frekvencí okolo 120 Hz a 200 – 250 Hz, tedy v oblasti frekvencí, kde se projevuje dynamická síla P_2 a P_1 .

Na Obr. 11.19 jsou frekvenční spektra z třetího měření na výhybce č. 59. Je vidět, že došlo k nárůstu hodnot zrychlení kmitání v celém frekvenčním spektru a u všech snímačů, kromě snímače ve šterkovém loži (A0Z). Tuto skutečnost je možné vysvětlit tím, že pražec již zcela nedosedá na šterkovou lavičku a v místě snímače se vibrace přenášejí méně. Velký rozdíl je vidět i na křídlové kolejnici v podélném směru na frekvenci okolo 10 Hz, která odpovídá působení jednotlivých náprav vlaku na konstrukci. To připisují zhroucení geometrie přechodu vlivem velkého zatlačení pražce pod srdcovkou a tím se větší část vibrací přenese i do podélného směru (A5X). V podélném směru dochází u obou měření k postupnému zvyšování zrychlení kmitání u frekvencí, které jsou zřejmě zodpovědné za dynamickou sílu P_2 a P_1 , tedy frekvenci okolo 85 Hz a 170 Hz.



Obr. 11.18 Welchova metoda, na přechodu z křídlové kolejnice do šterkového lože, druhé měření na výhybce č. 59

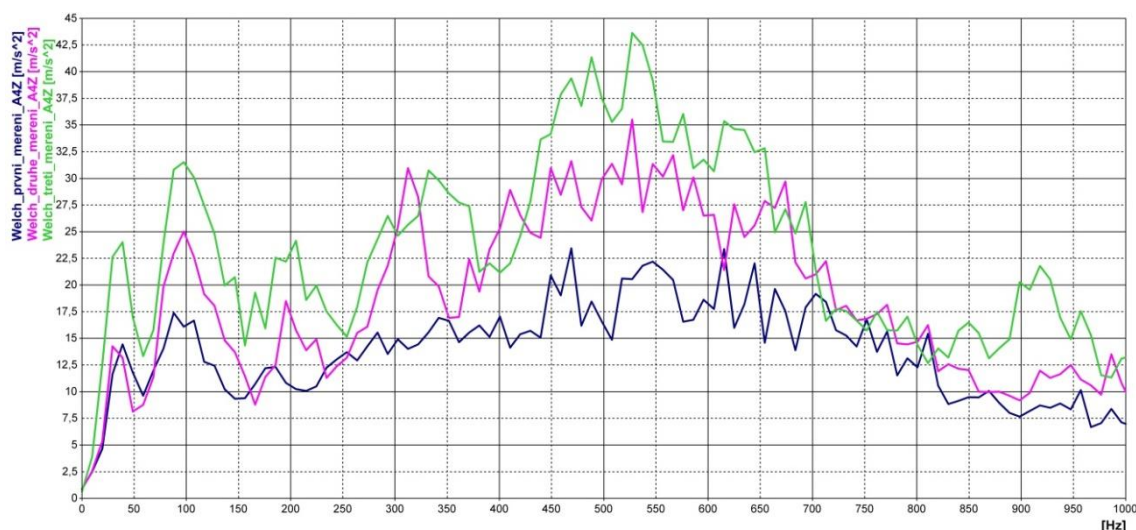


Obr. 11.19 Welchova metoda, na přechodu z křídlové kolejnice do šterkového lože, třetí měření na výhybce č. 59

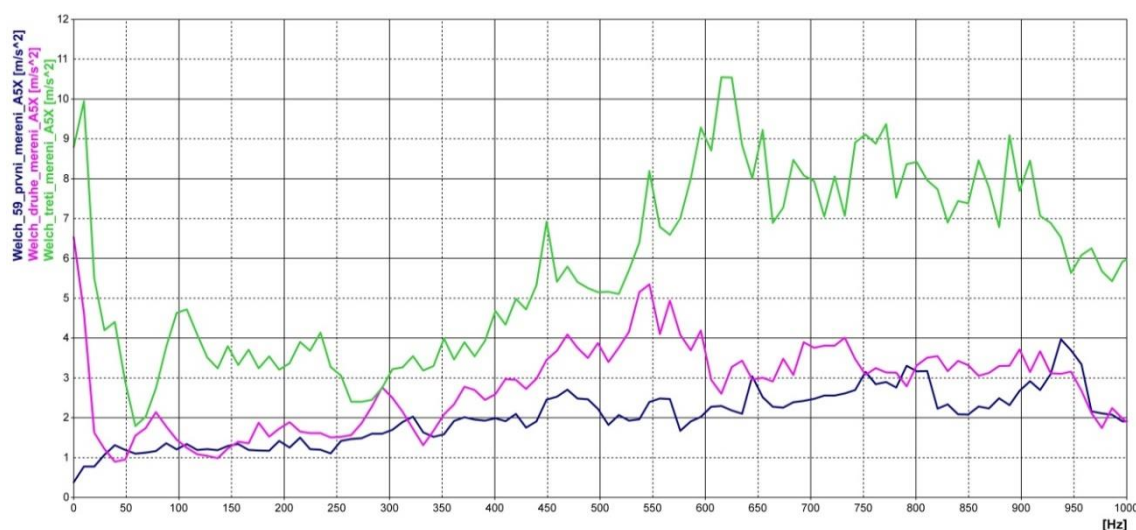
Na dalších třech grafech jsem se rozhodl prezentovat rozdíl mezi jednotlivými měřeními na výhybce č. 59. Vybral jsem tři signály, které popisují přechod vibrací z křídlové kolejnice do šterkového lože. Jsou jimi signály ze snímačů A4Z (na křídlové kolejnici ve svislém směru), A3Z (na pražci u srdcovky) a A0Z (ve šterkovém loži). Modrou barvou je prezentováno první měření, fialovou druhé a zelenou třetí. Na Obr. 11.20 jsou frekvenční spektra na křídlové kolejnici ve svislém směru (A4Z). Je vidět, že mezi prvním a druhým měřením došlo k navýšení hlavně v oblasti frekvencí okolo 100 Hz, 200 Hz, 320 Hz a okolo 400 – 600 Hz. Mezi druhým a třetím měřením došlo k opětovnému navýšení hodnot spektra zrychlení kmitání v oblasti frekvencí 40 Hz, 100 Hz, 200 Hz, 290 – 370 Hz, a 450 – 650 Hz. Navýšení zrychlení kmitání v oblasti frekvencí okolo 100 Hz připisuji zvětšujícímu se zatlačení pražců, což se projevuje především na této frekvenci, která pravděpodobně odpovídá složce dynamické síly P_2 . Frekvence okolo 200 Hz, okolo 330 Hz a možná i vyšší frekvenční složky odpovídají zřejmě zrychlení kmitání, které vyvolává síla P_1 . Jak je vidět, zrychlení kmitání (a tím i dynamické účinky) se s rostoucími poklesy pražců zvyšují, a to zejména v oblasti frekvencí, které by mohly odpovídat dynamickým silám P_1 a P_2 .

Na Obr. 11.21 jsou frekvenční spektra na křídlové kolejnici v podélném směru (A5X). Na těchto grafech bych chtěl prezentovat, jak se projeví zhroucení geometrie přechodu na srdcovce výhybky na zrychlení kmitání v podélném směru. Mezi prvním a druhým měřením je vidět znatelný nárůst především v oblasti velmi nízkých frekvencí do 10 Hz u třetího měření se tento nárůst ještě téměř zdvojnásobil. Z hlediska vlnových délek se jedná o frekvence, které odpovídají působení jednotlivých podvozků a náprav. Vlivem velkých zatlačení pražců se geometrie přechodu v srdcovce výhybky č. 59 zcela změnila a to se projevilo právě na těchto nízkých frekvencích. U třetího měření je vidět, že se objevil i výrazný frekvenční vrchol okolo 100 Hz, který by z frekvenčního hlediska

mohl odpovídat zrychlení kmitání vyvolané dynamickou silou P_2 . Domnívám se, že čím větší je zatlačení pražců, tím větší část zrychlení kmitání se přenáší i do podélného směru, neboli že větší část dynamické síly se realizuje i v podélném směru, což vyvolává až nepatrná posunutí srdcovky výhybky od náprav vlaku, která se projevují v oblasti velmi nízkých frekvencí do 10 Hz.



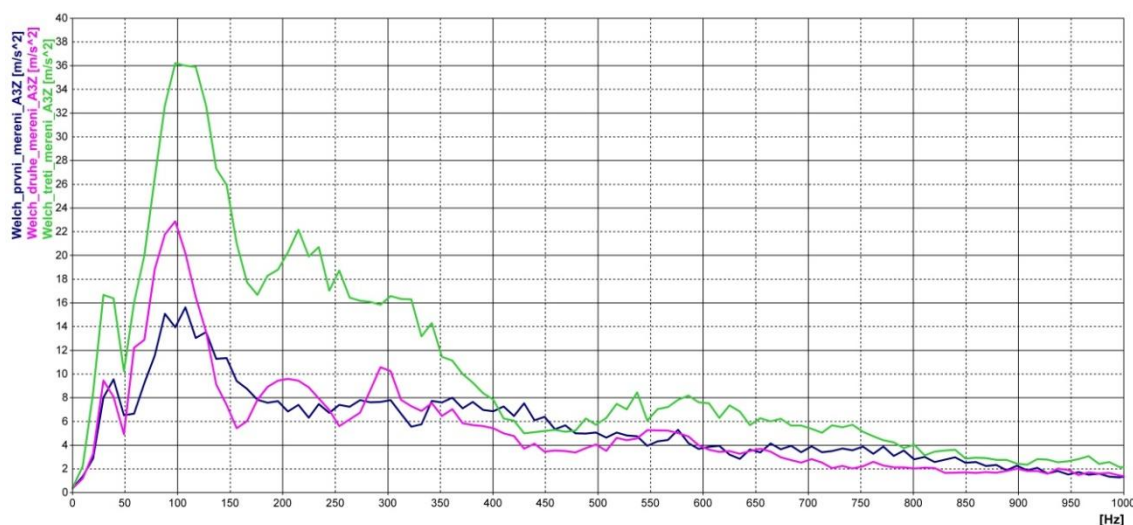
Obr. 11.20 Welchova metoda, porovnání měření na křídlové kolejnici ve svislém směru na výhybce č. 59



Obr. 11.21 Welchova metoda, porovnání měření na křídlové kolejnici v podélném směru na výhybce č. 59

Na Obr. 11.22 jsou grafy na snímači A3Z na pražci u srdcovky. Z grafu je patrné, že po navaření srdcovky se zvýšily hodnoty zrychlení vibrací na frekvencích 100 Hz, poté okolo 200 Hz a okolo 300 Hz. Půl roku po podbití srdcovky se zvýšily hodnoty zrychlení vibrací prakticky v celém spektru, především v oblasti frekvencí 40 Hz, 100 Hz a 200 – 350 Hz. Vliv zatlačení pražce se pražce se však nejvíce projev

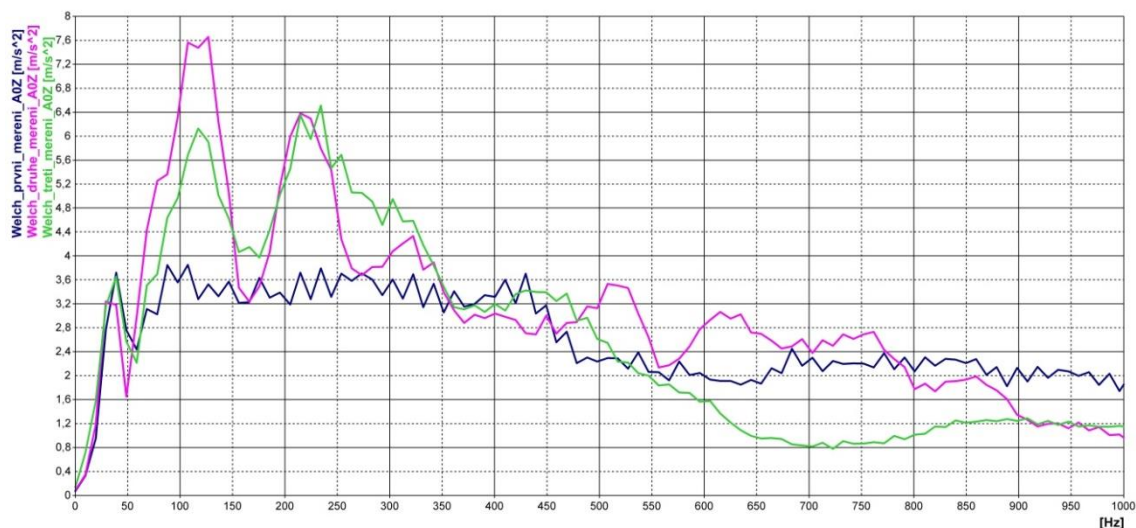
v oblasti frekvencí okolo 100 Hz, kde došlo oproti prvnímu měření k více než dvojnásobnému nárůstu hodnot zrychlení kmitání. Pokud se podíváme, jak se měnily hodnoty zatlačení pražců (Obr. 11.13), zjistíme, že došlo k více než dvojnásobnému nárůstu. Lze tedy vypožorovat jistou paralelu mezi zatlačením pražců a zrychlením kmitání na pražci u srdcovky v oblasti frekvencí okolo 100 Hz. Nárůst v oblasti frekvencí okolo 200 Hz a 300 Hz u druhého měření může být způsoben navařením srdcovky. Tím se totiž změnila kontaktní geometrie ve výhybce a je možné, že se to projevilo právě v oblasti těchto frekvencí. Z teoretických studií a modelování bylo zjištěno (viz. kapitola 4), že složky dynamické síly P_1 se projevují právě v oblasti frekvencí okolo a nad 200 Hz. Frekvence okolo 100 Hz by pak mohly být interpretovány jako složky dynamické síly P_2 . K této hypotéze mne vede především fakt, že je tato frekvenční složka nejvyšší právě na pražci a že se se zvětšujícím zatlačením pražce zvětšuje. Jak bylo v teoretické části (kapitola 4) uvedeno, síla P_2 se ve frekvenčním spektru projevuje v široké oblasti frekvencí od 40 Hz do 80 Hz, ovšem také je předpoklad, že toto pásmo se může rozšířit v závislosti na stavu konstrukce, geometrii přechodu a vlastnostech projíždějících vozidel (hmotnost na nápravu, odpružení). Síla P_2 zatěžuje srdcovku ohybovým napětím, takže vlastně přímo souvisí se zatlačením pražce, který srdcovku podepírá.



Obr. 11.22 Welchova metoda, porovnání měření na pražci pod srdcovkou na výhybce č. 59

Na Obr. 11.23 jsou grafy na snímači A0Z ve šterkovém loži. Z grafů je patrné, že u druhého a třetího měření došlo k navýšení především v oblasti frekvencí okolo 120 Hz a mezi 200 Hz a 250 Hz. U druhého měření jsou hodnoty zrychlení kmitání na frekvenci okolo 120 Hz nejvýraznější. Vzhledem k tomu, že se jedná o frekvenci, která je spojena se zatlačením pražce, mám pro tuto skutečnost vysvětlení, že u posledního měření jsou zatlačení pražců natolik velké, že pražec zcela nedosedá na šterkovou lavičku a proto a to se projevilo právě na poklesu této frekvenční složky u třetího měření. Frekvenční

interval mezi 200 Hz a 250 Hz, připisují stavu kontaktní geometrie na srdcovce výhybky a z frekvenčního hlediska by se mohlo jednat o zrychlení vibrací odpovídající teoretické dynamické síle P_1 . Z toho usuzují, že šterkové lože je namáháno vlivem velkého dynamického zatížení na srdcovce výhybky a klíčové frekvenční složky zodpovědné za toto namáhání se přenášejí až do šterkového lože.



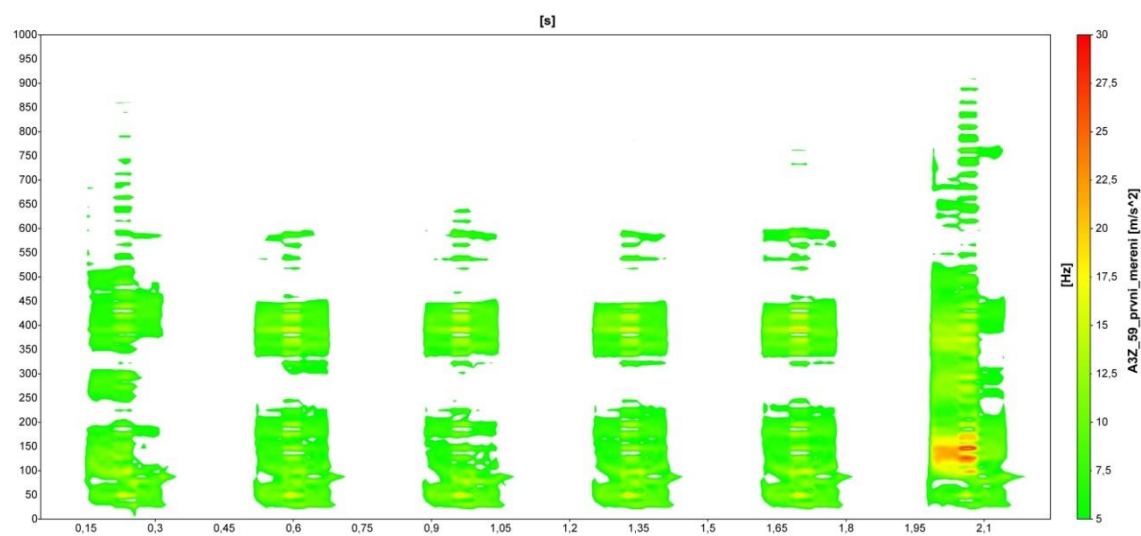
Obr. 11.23 Welchova metoda, porovnání měření ve šterkovém loži na výhybce č. 59

11.7.3. Vyhodnocení v časově-frekvenční oblasti – STFT

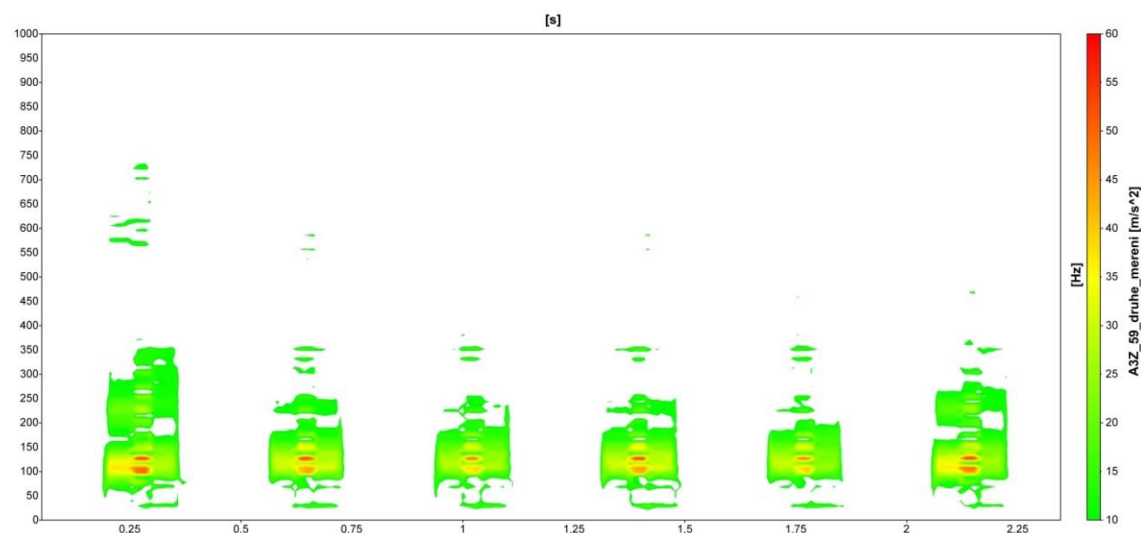
Pro porovnání v časově-frekvenční rovině jsem vybral jednotky LEO Express. Pro ně jsem vypočítal STFT a zpracoval hustotní spektrogram (spektrogramy jsou součástí přílohy měření v Chocni, kde jsou i přehledněji vyobrazeny na celou stranu). Na hustotním spektrogramu je na ose x čas na ose y frekvence a barevná stupnice určuje velikost zrychlení na jednotlivých frekvencích. Důvodem výběru souprav LEO Express je to, že tyto jednotky jely přes měřené místo stejnou rychlostí a u všech měření mám porovnatelné soupravy. Také jsem chtěl na této analýze ukázat, že časová lokalizace klíčových frekvenčních složek odpovídá průjezdu jednotlivých podvozků (náprav) vlaku. Z této analýzy je také vidět, že působení jednotlivých podvozků (náprav) vlaku může být velmi rozdílné, především první a poslední nápravy vykazují často větší dynamické účinky. Jinak lze říci, že časově-frekvenční analýza potvrdila závěry z analýzy frekvenční. V přílohách měření v Chocni jsou hustotní spektrogramy soupravy LEO Express na snímačích A4Z, A3Z a A0Z pro všechna čtyři měření v Chocni. Vybral jsem signály, které popisují přechod zrychlení kmitání z křídlové kolejnice do pražce a šterkového lože, protože na této analýze je vidět, jak dynamický ráz na srdcovce výhybky prochází konstrukcí. Pro prezentaci v textové části disertační práce jsem vybral signály ze snímače A3Z, který je na pražci pod srdcovkou, na nich je nejlépe vidět změna dynamického zatížení při jednotlivých měřeních.

Na Obr. 11. 24 je vidět hustotní spektrogram pro první měření v Chocni. Na spektrogramu je vidět, že klíčové frekvenční složky jsou rozloženy do širokého intervalu frekvencí, z něž vystupují špičky v oblasti 40 Hz, 100 Hz, 400 Hz. Je vidět, že poslední podvozek má výraznější frekvenční špičky v oblasti frekvencí mezi 100Hz až 150 Hz.

Na Obr. 11. 25 je vidět hustotní spektrogram pro druhé měření v Chocni. Na spektrogramu je vidět, že došlo k zúžení důležitých frekvenčních složek do 350 Hz. Nejvýraznější špičky jsou již u všech podvozků na frekvencích okolo 100 Hz a okolo 120Hz a také nabývají dvojnásobných hodnot jako u prvního měření.



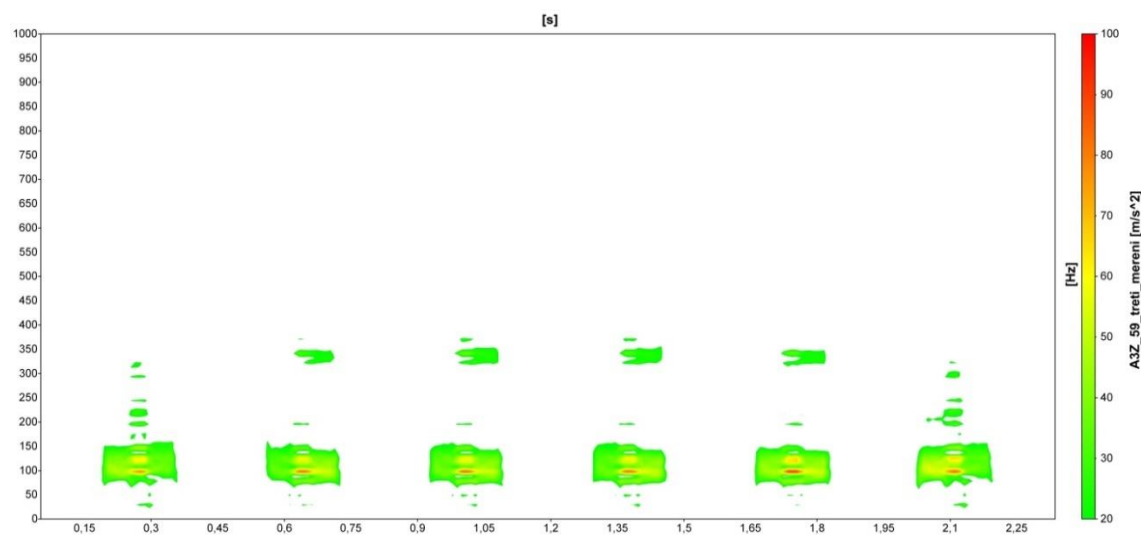
Obr. 11.24 STFT, na pražci u srdcovky výhybky č. 59, první měření



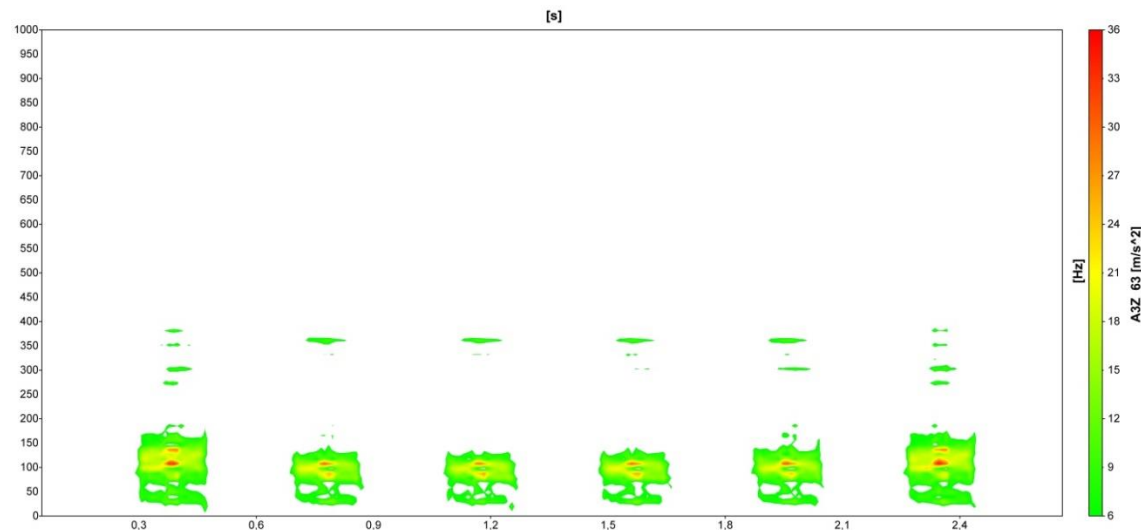
Obr. 11.25 STFT, na pražci u srdcovky výhybky č. 59, druhé měření

Na Obr. 11. 26 je vidět hustotní spektrogram pro třetí měření v Chocni. Na spektrogramu je vidět, že došlo k dalšímu zúžení důležitých frekvenčních složek do

intervalu mezi 75 Hz až 150 Hz a poté okolo 350 Hz. Největší špičky jsou okolo 100 Hz a nabývají více než trojnásobných hodnot, jako u prvního měření. Velmi podobná situace jako u výhybky č. 59 na třetím měření (Obr. 11.26) je i na výhybce č. 63 (Obr. 11.27), která vykazovala také velké zatlačení pražců. Na výhybce č. 63 jsou však hodnoty téměř třetinové, což připisují tomu, že srdcovka je ještě relativně nová a má menší ojetí a tím i lepší geometrii přechodu.



Obr. 11.26 STFT, na pražci u srdcovky výhybky č. 59, třetí měření



Obr. 11.27 STFT, na pražci u srdcovky výhybky č. 63

I z časově-frekvenční analýzy na pražci u srdcovky je patrné, že se klíčové frekvenční složky přesouvají do intervalu, který odpovídá zrychlením, která vyvolává dynamická síla P_2 . Navíc je vidět, že zatímco u prvního měření vykazoval výraznější dynamické účinky poslední podvozek, tak u dalších měření se frekvenční špičky objevují u všech podvozků. Lze tedy vyslovit hypotézu, že geometrie přechodu je již vlivem velkých

zatlačení pražců velmi nepříznivá a každý podvozek vyvolává velké dynamické účinky, bez ohledu na to, jakým způsobem do srdcovky najel.

11.8. Celkové vyhodnocení měření v Chocni

Na porovnání výhybek č. 59 a 63 je vidět, že přestože má srdcovka výhybky č. 59 horší kontaktní geometrii na přechodu z křídlové kolejnice na hrot srdcovky a vyšší zrychlení vibrací na křídlové kolejnici i na pražci, tak celkové dynamické účinky jsou větší na výhybce č. 63. Záleží totiž na tom, na kterých frekvencích se zrychlení realizují. Dynamické zatížení srdcovky výhybky č. 63 je vidět především na frekvencích okolo 40 Hz, mezi 100 Hz a 130 Hz, okolo 200 Hz, mezi 200 Hz a 250 Hz a mezi 300 Hz až 400 Hz. Zrychlení na frekvencích okolo 40 Hz a 100 – 130 Hz je pravděpodobně vyvolána dynamickou silou P_2 , která se přenáší na celý systém, což by souhlasilo s tím, že tato frekvence se přenáší nejvíce do pražce, ale i do stěrkového lože. Zrychlení kmitání nad 200 Hz by pak mohly být vyvolány silou P_1 , která způsobuje především kontaktní napětí na křídlové kolejnici a hrotu srdcovky. Je to velmi pravděpodobné, protože tyto frekvence se realizují především na křídlové kolejnici a do pražce a stěrkového lože se přenáší již méně. Z měření na výhybce č. 59 je vidět, že opravy navaření a podbitím srdcovky neměly příliš velký účinek na dynamické zatížení srdcovky. Zvětšující se zatlačení pražců způsobilo zhroucení geometrii přechodu, zvětšilo úhel α (popsaný v kapitole 2) a tím i dynamické účinky působící na srdcovku výhybky. Tato skutečnost se projevila především na frekvenci okolo 100 Hz na pražci, ale i na dalších frekvencích, které jak se domnívám, mají spojitost s dynamickým zatížením srdcovky a silami P_1 a P_2 . Čím více se zvětšovalo zatlačení pražců, tím více se zvětšoval rozdíl ve zrychleních na frekvenci okolo 100 Hz, tento fakt by šel využít v diagnostice výhybek. Především rozdíl mezi zrychleními kmitání okolo 100 Hz na snímači u pražce (A3Z) a za hlavou pražce v přímé koleji (A1Z) má spojitost s pohyby pražců, to je možné také využít v diagnostice výhybek. Z hroucení geometrie přechodu z křídlové kolejnice na hrot srdcovky se také projeví na křídlové kolejnici v podélném směru a to jak v časové, tak ve frekvenční oblasti.

Celkově lze říci, že navržená metodika analýzy dynamických účinků umožňuje sledovat komplexně chování výhybky. Dokonce se domnívám, že jsem schopen pouze z několika snímačů zrychlení vibrací vyhodnotit jak kvalitu kontaktní geometrie na přechodu z křídlové kolejnice na hrot srdcovky, tak i kvalitu podepření pražce přímo pod hrotem srdcovky. První vybraným měřicím místem by byl svislý směr na křídlové kolejnici (A4Z), kdy z dat z tohoto snímače můžu vyhodnotit velikost zrychlení na frekvencích, které pravděpodobně odpovídají dynamickým silám P_1 a P_2 a tím mohu v podstatě odhadnout míru dynamického zatížení srdcovky výhybky. Také z časového vyhodnocení minim a maxim, případně plochy pod klouzavou RMS je možné stanovit, jestli se kontaktní geometrie na přechodu z křídlové kolejnice na hrot srdcovky zlepšuje, či nikoliv. Druhým místem měření je podélný směr na křídlové kolejnici (A5X). Jak se

ukázalo, tak v časové i ve frekvenční rovině se zhroucení geometrie přechodu projeví právě na tomto snímači, protože čím větší je úhel α (popsaný v kapitole 2), tím větší část dynamické energie se přenesení do podélného směru. Třetím měřicím místem by byl snímač na pražci u srdcovky (A3Z). Z tohoto snímače jsem schopen zjistit, jaké frekvenční složky se do pražce přenáší a odhadnout tak kvalitu podepření pražce. Protože se ukázalo, že především rozdíl ve zrychleních na frekvenci okolo 100 Hz na pražci u srdcovky (A3Z) a na hlavě pražce v přímém směru (A1Z) má spojitost se zatlačením pražce, tak bych použil i snímač A1Z. Z těchto 4 snímačů jsem schopen získat informace, které dle mého názoru mohou ohodnotit například vliv údržbových prací na dynamické účinky na srdcovce výhybky.

12. Měření v žst. Ústí nad Orlicí

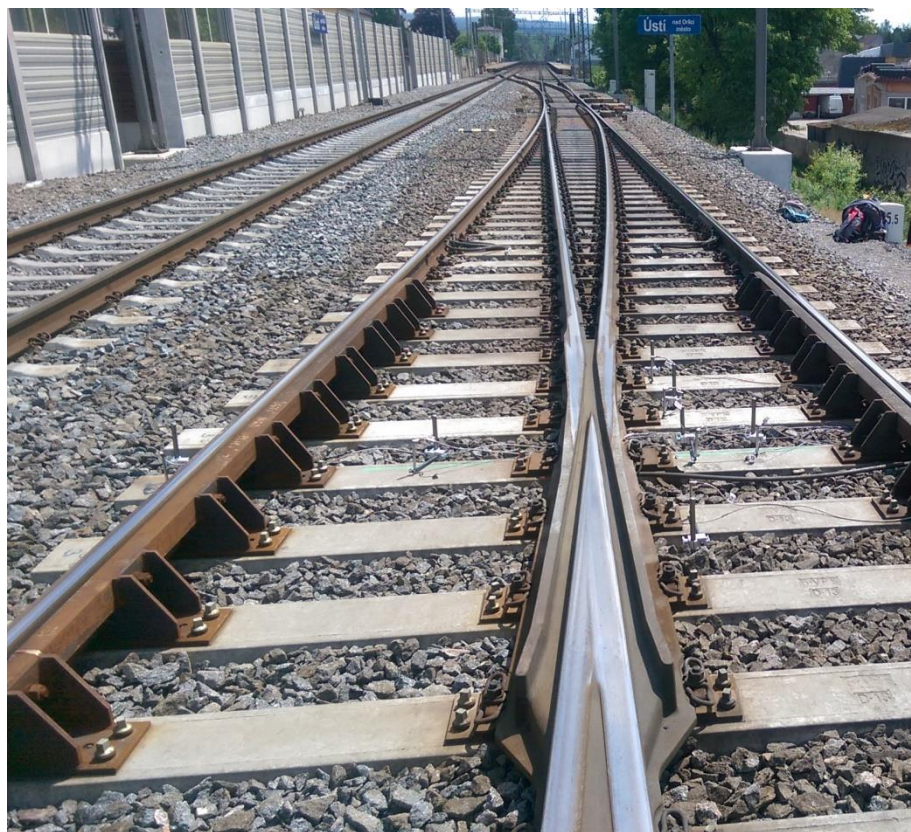
Měření v Ústí nad Orlicí bylo zrealizováno v rámci projektu Zvýšení kvality jízdní dráhy ve výhybkách pomocí zpružnění (kód projektu TA01031297), který je podporovaný Technologickou agenturou České republiky. Cílem měření bylo stanovit vliv nově vyvinutého uzlu upevnění (Obr. 5.8) na dynamické účinky na srdcovce výhybky. Uzel upevnění TA3718 je instalovaný na výhybce č. 3 a pro srovnání byla vybrána výhybka č. 4, která s výhybkou č. 3 tvoří jednoduchou kolejovou spojkou (Obr. 12.1).

12.1. Popis lokality měření a měřených výhybek

Obě vybrané výhybky jsou na třebovském zhlaví žst. Ústí nad Orlicí. Obě byly vloženy v rámci velké rekonstrukce stanice na konci léta minulého roku 2014. Obě výhybky se nachází na vysokém násypu. Pod výhybky byly v několika vybraných řezech instalovány tlakové snímače a do šterkového lože byly instalovány měřicí kameny, jak je popsáno v kapitole 6 týkající se metodiky měření (Obr. 6.10). Já se ve své práci budu věnovat srovnání z měření pomocí měřicích kamenů přímo pod srdcovkou výhybky. Obě výhybky tak budu porovnávat z hlediska metodiky měření popsané v kapitole 6 a současně budou srovnány i data z měřicích kamenů pod srdcovkou výhybky. 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. 12.3) má klasické upevnění pomocí žebrových podkladnic na betonových pražcích se svěrkami Skl 24, tedy upevnění, které je dnes nejvíce používáno pro výhybky v hlavních kolejích a je umístěna v koleji č. 2. Výhybka č. 3 (Obr. 12.2) má nový typ upevnění TA3718 pomocí žebrových podkladnic na betonových pražcích se svěrkami Skl 24a je umístěna v koleji č. 1. Hlavní rozdíl mezi upevněními je v podložce pod patu kolejnice.



Obr. 12.1 Situace části zhlaví žst. Ústí nad Orlicí, měřené výhybky jsou označeny modrou elipsou [94]



Obr. 12.2 *Pohled na výhybku č. 3 v žst. Ústí nad Orlicí*



Obr. 12.3 *Pohled na výhybku č. 4 v žst. Ústí nad Orlicí*

12.2. Metodika a parametry měření

Pro obě měření v Ústí nad Orlicí byla použita metodika měření pohybového chování a metodika měření zrychlení vibrací v srdcovkové části výhybky tak, jak je popsána v kapitole 6 (Obr. 6.1). Měření tenzometry nebyla realizována, protože provozní podmínky to nedovolovaly. Parametry měření jsou uvedeny níže:

- Vzorkovací frekvence: 10kHz
- Dolní propust: 1kHz
- Horní propust: 3Hz (ve šterku 0,3Hz)
- Počet měřených kanálů: 17 (8 – pohyby, 9 – vibrace)
- Počet měřicích dnů: 2 (22. 5. 2015 – výhybka č. 3)
(27. 5. 2015 – výhybka č. 4)
- Počet změřených vlaků: vždy minimálně 25

12.3. Vyhodnocení měření v žst. Ústí nad Orlicí

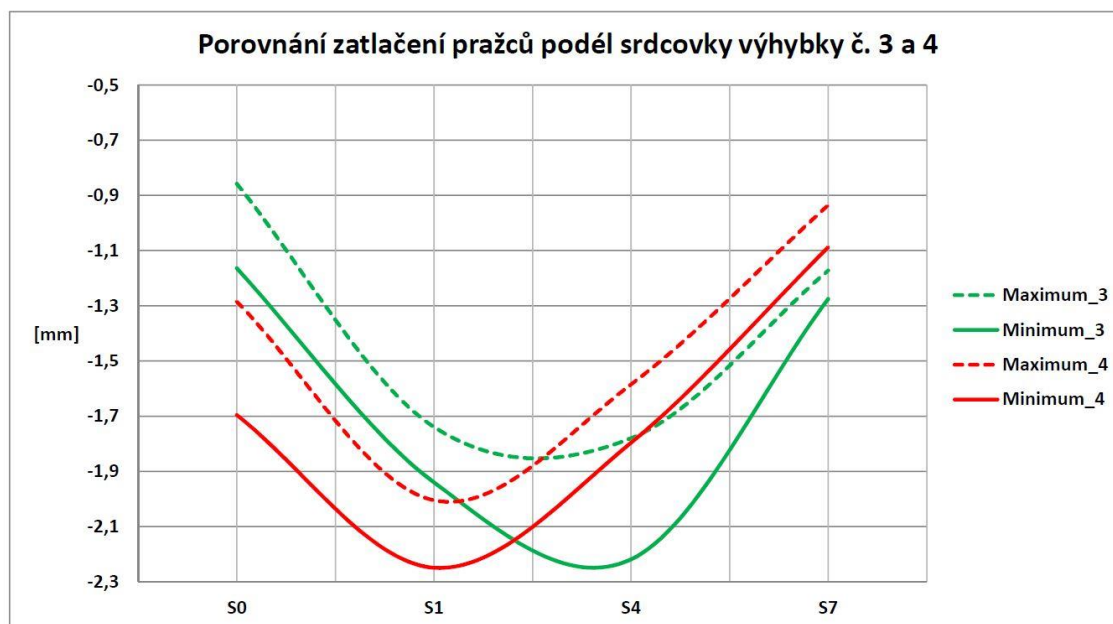
Vyhodnocení měření mám rozděleno do dvou bloků. V prvním se budu zabývat pohybovým chováním konstrukce pod zatížením projíždějícími soupravami a sledovat především zatlačení pražců. V druhém bloku budu vyhodnocovat šíření vibrací konstrukcí a hodnotit dynamickou odezvu na zatížení od projíždějících souprav. Podobně jako u předchozích měření je vyhodnocení měření rozděleno na časovou, frekvenční a časově-frekvenční oblast. Stejně jako u všech měření jsem použil pro první náhled na problematiku přehledové grafy se zrychlením kmitání a frekvenčním spektrem spočítaným pomocí FFT. V časové oblasti jsou hodnocena minima a maxima zrychlení kmitání a také plocha pod křivkou klouzavé RMS. Pro hodnocení ve frekvenční oblasti jsem vybral porovnatelné vlaky a lokomotivu na obou výhybkách a spočítal na nich frekvenční spektra pomocí Welchovy metody. V časově-frekvenční oblasti jsem se rozhodl pro prezentaci formou hustotních spektrogramů, kde je hodnota zrychlení na jednotlivých frekvencích zobrazena barevným odstínem. Do disertační práce jsem uvedl pouze zlomek spočítaných grafů a to především z toho důvodu, aby přílohy k práci nebyly příliš rozsáhlé. Věřím, že i tak je vybraná část dostatečně reprezentativní. Tabulky změřených vlaků jsou součástí přílohy k měření v Ústí nad Orlicí.

12.4. Vyhodnocení pohybového chování

Při vyhodnocování pohybového chování konstrukce jsem si nejdříve připravil přehledné grafy pohybů pražců po délce srdcovky a pohybů pražce pod srdcovkou. Vybral jsem jen část grafů, které reprezentovaly porovnatelné vlaky na obou výhybkách. Tyto grafy jsou součástí přílohy této disertační práce pro měření v Ústí nad Orlicí. V grafech jsou vlevo pod sebou snímače, které sledují pohyby pražců podél srdcovky a vpravo pod sebou jsou snímače na pražci pod srdcovkou. Ze srovnání grafů je patrné, že chování

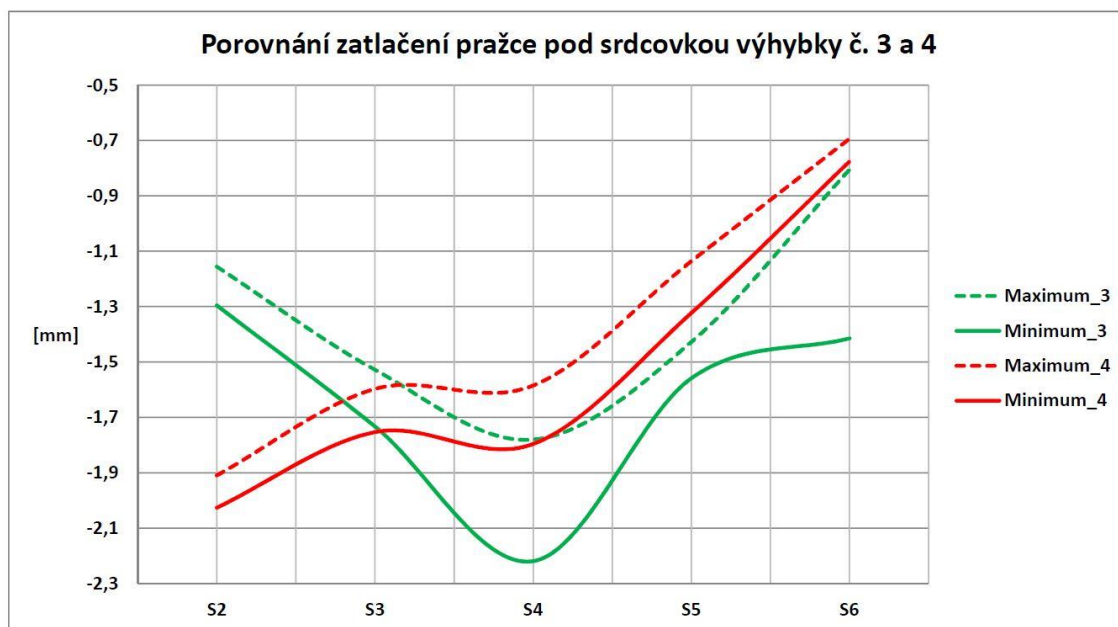
obou výhybek je prakticky totožné. Na grafech je vidět, že před první nápravou dojde nejprve ke zdvihu pražce a až poté k jeho zatlačení nápravou, podobně jako tomu bylo u měření v Chocni. Také je vidět, že největší zatlačení vykazují lokomotivy. Ucelené jednoty (Pendolino a LEO Express) mají zatlačení pražců od všech náprav prakticky stejné. Také je vidět, 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. Na snímači S6 (za hlavou pražce v odbočné větvi) dochází při průjezdu vlaku ke zdvihům. Hlava pražce v odbočné větvi není zatížena, proto je to logické. Na výhybce č. 4 jsou však zdvihy téměř o polovinu větší. Kompletní grafy od vybraných vlaků a tabulka maximálních zatlačení pražců jsou součástí přílohy k měření v Ústí nad Orlicí.

I pro měření v Ústí nad Orlicí jsem zpracoval “průhybové“ křivky pro pražec pod srdcovkou a pro pražce podél srdcovky výhybky. Opět jsem z každého vlaku vybral maximální hodnotu zatížení a z nich sestavil křivky minimálního a maximálního “průhybu“ jako obalové křivky. Na Obr. 12.4 jsou průhybové křivky pražců podél srdcovky výhybky. Zelenou barvou jsou křivky na výhybce č. 3 a červenou barvou jsou křivky na výhybce č. 4. Čárkovaně je křivka minimálních zatlačení a plnou čarou je křivka maximálních zatlačení. Jak je z křivek vidět, tak obě výhybky vykreslují téměř dokonalou průhybovou křivku a i maxima a minima jsou velmi podobná. Rozdíl je však vtom, že zatímco na výhybce č. 3 je maximum na snímači S4, tak na výhybce č. 4 je maximum na snímači S1.



Obr. 12.4 Srovnání průhybových křivek pražců podél srdcovky výhybky

Na Obr. 12.5 jsou průhybové křivky pro pražec pod srdcovkou, křivky jsou označeny stejně jako u předchozího grafu. Na průhybových křivkách pražce pod srdcovkou je vidět rozdílné chování obou konstrukcí. Zatímco na výhybce č. 3 je průhybová křivka zcela plynulá s maximem na snímači S4, což je dle očekávání, neboť v místě snímače S4 je díky dynamickému rázu pražec nejvíce namáhán. U výhybky č. 4 je tomu zcela jinak. Největší zatlačení jsou za hlavou pražce v přímé větvi výhybky, poté křivka stoupá k ose přímé koleje (snímač S2) a od něj opět klesá do snímače S4 u srdcovky, což připisují dynamickému zatížení na srdcovce výhybky. Od srdcovky pak křivka plynule stoupá. Dochází tak částečně k naklonění pražce, to je patrné i z větších zdvihů pražce na snímači S6, které možné vidět na grafech v přílohách k měření v Ústí nad Orlicí. Toto chování pražce připisují tomu, že zatímco výhybka č. 4 byla dva měsíce před měřením podbita, tak výhybka č. 3 podbita nebyla. Podbití výhybky č. 4 bohužel změnilo zatlačení pražců a nelze říci, zda by bylo chování pražců stejné i bez podbití.



Obr. 12.5 Srovnání průhybových křivek pražce pod srdcovkou výhybky

Celkově lze však říci, že především pražce po délce srdcovky se chovají velmi podobně. Kola vlaku přechází z hrotu srdcovky na křidlovou kolejnici někde mezi snímači S1 a S4 a z tohoto pohledu lze říci, že jsou obě konstrukce porovnatelné. V dalším bloku se budu soustředit na porovnání dynamických účinků na obou výhybkách.

12.5. Vyhodnocení zrychlení vibrací

Vyhodnocení zrychlení vibrací jsem opět rozdělil do tří částí. Vyhodnocení v časové rovině, vyhodnocení ve frekvenční rovině a vyhodnocení v časově-frekvenční rovině. Ve všech třech rovinách jsem provedl srovnání výhybek č. 3 a 4. Pro srovnání v časové rovině jsem vybral z měřených vlaků porovnatelné soupravy. Pro podrobnější

frekvenční analýzu jsem vybral z měřených vlaků dvě srovnatelné soupravy (LEO Express a Pendolino) a lokomotivu řady 380, protože ty projížděly přes obě výhybky stejnou rychlostí a zároveň využily maximální traťové rychlosti. Ostatní vlaky projížděly pomaleji a pro cíle projektu i mé práce jsou zajímavější především maximální dynamické účinky, které vyvolávají nejrychlejší vlaky. Opět jsem vybral zlomek z vyhotovených grafů, které budu prezentovat a uvádět do přílohy k měření v Ústí nad Orlicí, tentokrát mi šlo především o to, vybrat do porovnání stejné vlaky se stejnou rychlostí u obou výhybek, abych nejlépe srovnal dynamické účinky na obou výhybkách.

12.5.1. Vyhodnocení v časové rovině

V časové oblasti jsem si nejprve ke všem snímačům zobrazil jejich časový průběh, což je vidět na vybraných vlcích v příloze k měření v Chocni. Jde o přílohu, kde je zobrazen časový průběh zrychlení vibrací a jemu odpovídající frekvenční spektrum vypočtené pomocí FFT vedle sebe. Obrázky jsou uspořádány tak, že vlevo je vždy graf zrychlení vibrací a vpravo je odpovídající FFT. Grafy jsou uspořádány do dvou skupin. První je roznos vibrací pražcem pod hrotem srdcovky a druhou je přechod vibrací z křídlové kolejnice do šterkového lože. Z časového průběhu zrychlení kmitání jsem odečetl maximální a minimální hodnoty a zobrazil je do tabulek. Pro hodnotu plochy pod křivkou klouzavého RMS jsem vybral dvě ucelené jednotky (LEO Express a Pendolino) a pak také časové výřezy odpovídající průjezdu lokomotivy. Pro porovnání bylo důležité vybrat stejné soupravy a lokomotivy na obou výhybkách, které navíc projížděly přes výhybky stejnou, nebo velmi blízkou rychlostí.

V *Tab. 12.1* jsou hodnoty maximálních hodnot zrychlení kmitání na porovnatelných vlcích a lokomotivách, v *Tab. 12.2* jsou hodnoty minimálních zrychlení kmitání na stejných soupravách. Nejprve se budu věnovat srovnání maximálních a minimálních hodnot zrychlení kmitání na přechodu z křídlové kolejnice do šterkového lože. Na křídlové kolejnici ve svislém směru (A4Z) a podélném směru (A5X), jsou hodnoty na obou výhybkách porovnatelné, u poloviny vlaků jsou vyšší na výhybce č. 3 a u druhé poloviny vlaků na výhybce č. 4. Na křídlové kolejnici v příčném směru (A6Y) jsou na většině vlaků vyšší hodnoty zrychlení kmitání na výhybce č. 3, ale rozdíly jsou natolik malé, že lze konstrukce prohlásit za porovnatelné. Na pražci u srdcovky (A3Z) a ve šterkovém loži (A0Z) jsou, kromě hodnot od průjezdu soupravy Pendolino, na všech vlcích vyšší hodnoty zrychlení kmitání u výhybky č. 4. Z vyhodnocených maxim a minim zrychlení kmitání je zřejmé, že na křídlové kolejnici jsou hodnoty z obou výhybek porovnatelné, ale do pražce a šterkového lože se přenáší více špičkových hodnot na výhybce č. 4. Uzel upevnění TA3718 na výhybce č. 3 tedy lépe tlumí špičkové hodnoty zrychlení kmitání.

V další části se budu soustředit na šíření zrychlení kmitání pražcem pod srdcovkou z hlediska minimálních a maximálních hodnot (*Tab. 12.1* a *Tab. 12.2*). Na hlavě pražce v přímé větvi výhybky (A1Z) jsou hodnoty minim a maxim zrychlení kmitání z celkového pohledu srovnatelné, mírně vyšší na výhybce č. 4. V ose přímé větve výhybky (A2Z) jsou špičkové hodnoty na rychlejších vlacích vyšší na výhybce č. 3, zatímco na pomalejších vlacích jsou vyšší na výhybce č. 4. Na pražci u srdcovky (A3Z) jsou, kromě hodnot od průjezdu soupravy Pendolino, na všech vlacích vyšší hodnoty zrychlení kmitání u výhybky č. 4. Na pražci v ose odbočné větve (A7Z) je situace podobná jako v ose koleje v přímé větvi výhybky. Za hlavou pražce v odbočné větvi výhybky (A8Z) jsou hodnoty minim a maxim vyšší u většiny vlaků na výhybce č. 4. Z hlediska šíření minimálních a maximálních hodnot zrychlení kmitání pražcem pod srdcovkou je situace taková, že u srdcovky, kde jsou největší dynamické účinky, jsou hodnoty vyšší na výhybce č. 4. Uzel upevnění TA3718 tedy lépe v tomto místě tlumí špičkové hodnoty. V osách obou větví výhybky jsou na vlacích s nižší rychlostí větší účinky na výhybce č. 4 a na vlacích s vyšší rychlostí na výhybce č. 3. Na základě výše popsaného lze vyslovit hypotézu, že to souvisí s vyššími zatlačenými pražců u výhybky č. 3. Rychlejší vlaky vyvozují vyšší dynamické účinky a ve spojení s většími zatlačenými na výhybce č. 3 na pražci u srdcovky se větší část dynamické energie přenáší do pražce v osách obou větví výhybky, kde je pražec podepřen lépe. Za hlavou pražce v odbočné větvi výhybky jsou vyšší hodnoty na výhybce č. 4, což zřejmě souvisí s většími zdvihy pražce v tomto místě u výhybky č. 4 a celkově větším nakloněním pražce pod zatížením u výhybky č. 4.

Souprava	Výhybka	Maximální hodnoty zrychlení vibrací [m/s ²]									Rychlost [km/h]
		A0Z	A1Z	A2Z	A3Z	A4Z	A5X	A6Y	A7Z	A8Z	
Leo Express	3	46,733	29,747	62,602	92,265	341,366	71,969	157,899	101,913	180,837	130
Leo Express	4	42,963	48,887	54,634	319,45	381,931	70,511	149,064	82,328	206,624	130
loko 362	3	28,76	78,216	71,719	79,957	476,196	142,36	163,287	133,463	256,738	91
loko 362	4	87,421	80,369	106,619	262,515	323,006	82,442	206,279	240,587	319,898	92
loko 380	3	42,343	119,557	131,636	169,838	440,557	122,447	183,184	195,765	320,584	131
loko 380	4	75,994	91,001	93,439	186,45	510,576	131,381	207,174	130,867	407,269	129
Pendolino	3	45,568	80,867	85,34	147,306	508,111	103,993	218,4	202,071	317,431	148
Pendolino	4	125,052	76,54	72,084	534,425	366,585	81,737	177,506	186,605	286,223	144
loko 150	3	25,141	46,137	65,557	74,14	314,933	79,501	152,41	101,017	244,691	80
loko 150	4	44,418	51,81	94,394	108,725	352,576	63,289	155,295	134,335	307,322	80

Tab. 12.1 Srovnání maximálních hodnot zrychlení vibrací u výhybky č. 3 a 4

Souprava	Výhybka	Minimální hodnoty zrychlení vibrací [m/s ²]									Rychlost [km/h]
		A0Z	A1Z	A2Z	A3Z	A4Z	A5X	A6Y	A7Z	A8Z	
Leo Express	3	-60,258	-59,692	-68,418	-64,129	-362,872	-82,851	-176,79	-68,019	-69,309	130
Leo Express	4	-45,957	-81,066	-71,872	-82,138	-331,646	-89,202	-142,885	-71,642	-84,792	130
loko 362	3	-39,177	-108,395	-90,066	-115,436	-570,879	-121,761	-167,303	-98,349	-82,797	91
loko 362	4	-94,259	-88,466	-93,729	-132,549	-378,838	-68369	-158,424	-135,271	-174,812	92
loko 380	3	-86,426	-270,639	-285,949	-276,202	-497,162	-119,803	-208,517	-185,815	-139,402	131
loko 380	4	-85,66	-91,214	-135,503	-134,304	-443,467	-117,883	-192,881	-108,498	-128,347	129
Pendolino	3	-117,423	-68,254	-121,126	-150,083	-341,786	-91,961	-208,425	-133,657	-125,389	148
Pendolino	4	-134,199	-93,995	-118,346	-175,587	-430,31	-146,589	-198,268	-135,133	-167,144	144
loko 150	3	-34,146	-43,397	-69,898	-70,922	-317,421	-89,626	-152,745	-83,568	-64,05	80
loko 150	4	-57,889	-60,185	-91,711	-83,826	-452,139	-63,466	-137,578	-84,129	-95,73	80

Tab. 12.2 Srovnání minimálních hodnot zrychlení vibrací u výhybky č. 3 a 4

V Tab. 12.3 jsou hodnoty ploch pod křivkou klouzavé RMS, která je jistým ekvivalentem energie působícího signálu. Nejprve se budu zabývat opět přenosem vibrační energie z křídlové kolejnice do šterkového lože. Na křídlové kolejnici ve svislém směru (A4Z) jsou vyšší hodnoty u všech vlaků, kromě Pendolina, na výhybce č. 3. Na křídlové kolejnici v příčném (A6Y) a podélném směru (A5X) jsou vyšší hodnoty u většiny vlaků na výhybce č. 3, ale rozdíly jsou většinou malé. Na pražci u srdcovky (A3Z) jsou hodnoty u všech vlaků vyšší na výhybce č. 4. Ve šterkovém loži (A0Z) jsou až na jeden případ také vyšší hodnoty zrychlení kmitání na výhybce č. 4. Na křídlové kolejnici jsou přece jen vyšší hodnoty u výhybky č. 3, což přisuzuji vyšší pružnosti v uzlu upevnění a srdcovka díky tomu může více kmitat, tento děj byl sledován i při měření v Poříčanech u výhybky s vulkanizovanými podložkami. Na pražci u srdcovky jsou již hodnoty na výhybce č. 3 nižší, což značí, že uzel upevnění TA3718 utlumil větší část dynamických účinků ze srdcovky výhybky. Ve šterkovém loži je také u výhybky č. 3 situace lepší, můžeme tedy říci, že se na přenosu vibrací z křídlové kolejnice do šterkového lože pozitivně projevil vliv uzlu upevnění TA3718 u výhybky č. 3.

Za hlavou pražce v přímé větvi výhybky (A1Z) jsou hodnoty ploch pod křivkou klouzavé RMS (Tab. 12.3) vyšší na výhybce č. 4. Na pražci v ose přímé větve výhybky (A2Z) a v ose odbočné větve výhybky (A7Z) jsou hodnoty, kromě soupravy Pendolino, prakticky stejné na obou výhybkách. Na pražci u srdcovky (A3Z) jsou hodnoty u všech vlaků vyšší na výhybce č. 4. Za hlavou pražce v odbočné větvi výhybky (A8Z) jsou na všech vlacích vyšší hodnoty na výhybce č. 4. Za hlavou pražce v přímé větvi výhybky jsou vyšší hodnoty na výhybce č. 4, což souvisí s většími zatlačenými pražce v tomto místě. V osách kolejí jsou hodnoty na obou konstrukcích porovnatelné, přestože u srdcovky se ukazuje pozitivní vliv upevnění TA3718, to pravděpodobně souvisí s většími zatlačenými pražce u srdcovky. Za hlavou pražce v odbočné větvi výhybky jsou větší hodnoty u výhybky č. 4, což souvisí s většími pohyby pražce v tomto místě u výhybky č. 4.

Souprava	Výhybka	Plocha pod křivkou klouzavé RMS [m/s]									Rychlost [km/h]
		A0Z	A1Z	A2Z	A3Z	A4Z	A5X	A6Y	A7Z	A8Z	
Leo Express	3	4,8	15,9	29,0	31,4	123,2	26,1	51,0	32,5	30,9	130
Leo Express	4	6,0	21,3	24,6	33,8	93,0	18,4	35,7	28,2	36,3	130
loko 362	3	2,0	5,6	7,9	8,8	43,1	9,7	19,2	9,0	10,1	91
loko 362	4	2,6	8,0	8,3	14,3	38,7	8,4	17,2	9,8	12,8	92
loko 380	3	3,6	5,9	11,9	12,0	49,4	11,2	20,4	14,5	13,3	131
loko 380	4	3,1	6,4	11,7	13,3	43,2	11,4	21,1	13,6	15,9	129
Pendolino	3	16,9	53,6	65,5	74,1	217,0	44,8	91,0	76,5	90,0	148
Pendolino	4	24,4	94,3	98,1	116,1	307,8	171,0	185,0	102,5	100,1	144
loko 150	3	2,0	6,5	9,0	9,7	49,9	10,3	20,9	9,9	10,5	80
loko 150	4	2,4	6,4	8,6	10,5	41,0	8,7	19,7	10,5	12,3	80

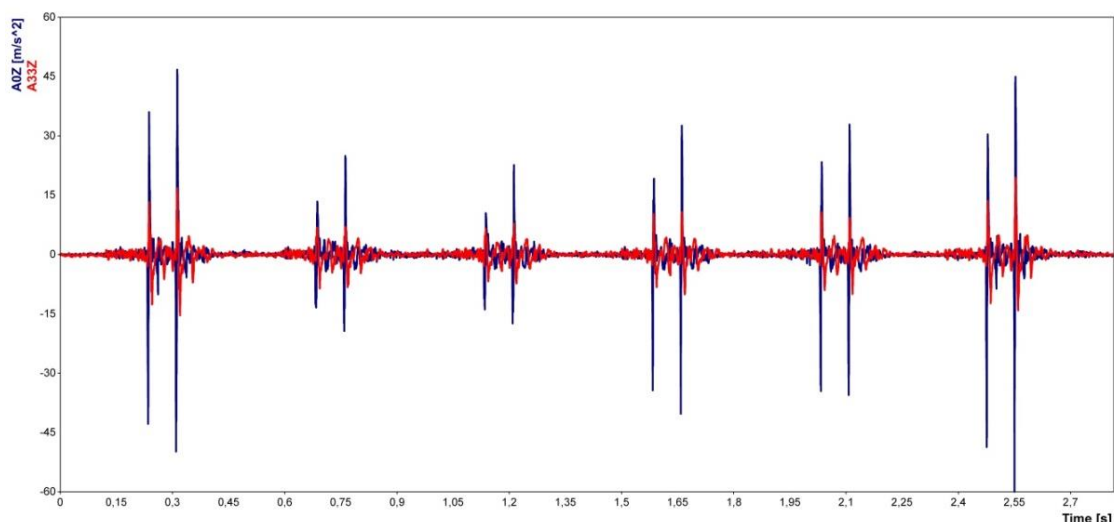
Tab. 12.3 Srovnání ploch pod křivkou klouzavé RMS u výhybky č. 3 a 4

V další Tab. 12.4 je srovnání snímače na měřicí tyči zapuštěné do šterkového lože (A0Z) a snímače přímo ve šterkovém loži v měřicím kameni ve svislém směru (A33Z), který je nejvýraznější. Jak je vidět, tak hodnoty minim a maxim zrychlení kmitání, stejně jako hodnoty ploch pod křivkou klouzavé RMS, jsou pro oba snímače (A0Z i A33Z) u většiny vlaků vyšší na výhybce č. 4. To svědčí o tom, že u výhybky č. 4 se do šterkového lože přenáší větší část dynamické energie. Rozdíl mezi výhybkami však není velký, nicméně na této skutečnosti lze vidět pozitivní účinek uzlu upevnění TA3718 u výhybky č. 3

Celkově jsou hodnoty špičkové hodnoty zrychlení kmitání na tyči ve šterkovém loži výrazně vyšší, než je tomu u měřicího kamene (Obr. 12.6). To je pravděpodobně tím, že část tyče, která není zatlučena do šterkového lože, může volně kmitat a hodnoty maxim a minim zrychlení kmitání tím zvětšovat.

Souprava	Výhybka	Minimum [m/s ²]		Maximum [m/s ²]		RMS [m/s]		Rychlost [km/h]
		A0Z	A33Z	A0Z	A33Z	A0Z	A33Z	
Leo Express	3	-60,258	-15,4	46,733	19,5	4,8	3,8	130
Leo Express	4	-45,957	-18,4	42,963	24,2	6,0	4,4	130
loko 362	3	-39,177	-15,2	28,76	19,8	2,0	1,9	91
loko 362	4	-94,259	-24,3	87,421	26,6	2,6	2,3	92
loko 380	3	-86,426	-19,9	42,343	82,0	3,6	2,8	131
loko 380	4	-85,66	-47,3	75,994	57,6	3,1	2,7	129
Pendolino	3	-117,423	-20,4	45,568	31,6	16,9	10,7	148
Pendolino	4	-134,199	-30,2	125,052	42,6	24,4	12,7	144
loko 150	3	-34,146	-17,9	25,141	20,0	2,0	2,0	80
loko 150	4	-57,889	-23,3	44,418	24,5	2,4	1,9	80

Tab. 12.4 Srovnání ploch pod křivkou klouzavé RMS u výhybky č. 3 a 4 (snímač A0Z na tyči zatlučené do šterkového lože, snímač A33Z z měřicího kamene ve šterkovém loži)



Obr. 12.6 Srovnání časového průběhu zrychlení kmitání ve svislém směru ve štěrkovém loži – souprava LEO Express (modrou barvou je signál ze snímače na měřicí tyči, červenou barvou je signál ze snímače v měřicím kameni ve štěrkovém loži)

12.5.2. Vyhodnocení ve frekvenční rovině

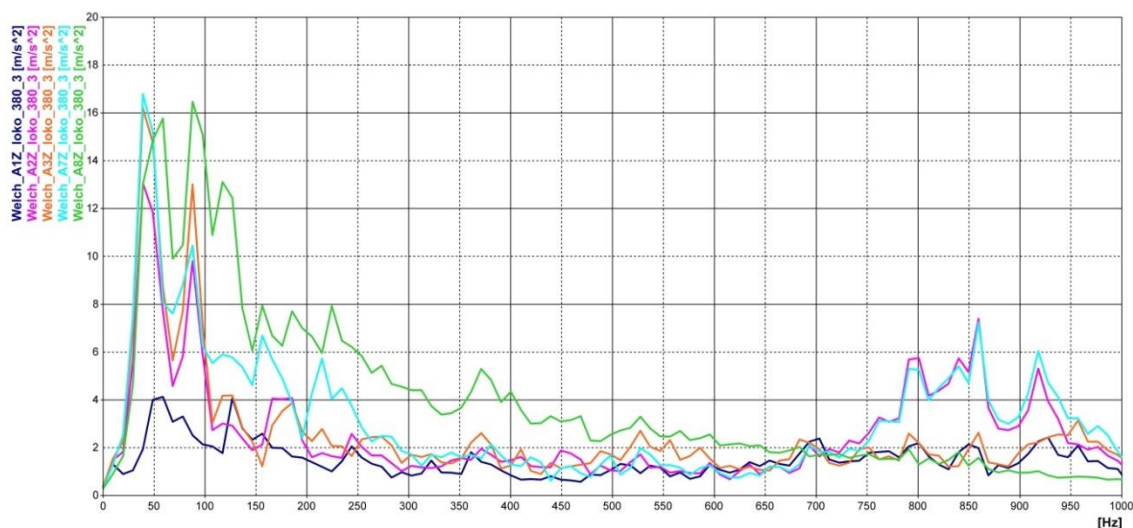
Ve frekvenční oblasti jsem se nejprve zaměřil na analýzu přehledných grafů, které jsou na srovnatelných vlcích součástí přílohy měření v Ústí nad Orlicí. Grafy jsou zobrazeny pro porovnatelné vlaky na obou výhybkách. Pro první náhled a zhodnocení jsou ideální. Obrázky v příloze měření v Ústí nad Orlicí jsou vždy uspořádány tak, že vlevo je časový průběh zrychlení vibrací a vpravo je z časového průběhu vypočítané frekvenční spektrum pomocí FFT. Z těchto přehledných grafů lze pozorovat klíčové frekvenční shluky. Na výhybce č. 3 jsou na křídlové kolejnici ve svislém směru (A4Z) nejvýraznější frekvence okolo 40 Hz, poté mezi 100 Hz – 150 Hz, 200 Hz – 300 Hz, 400 – 500 Hz a okolo 600 Hz. Na křídlové kolejnici v příčném směru (A6Y) se na výhybce č. 3 objevuje výrazný frekvenční vrchol okolo 80 Hz. Na snímačích na pražci jsou pak u výhybky č. 3 výrazné frekvence okolo 40 Hz a poté okolo 80 Hz. Ve štěrkovém loži jsou u výhybky č. 3 klíčové frekvenční složky okolo 30 Hz a také 100 Hz. U výhybky č. 4 jsou na křídlové kolejnici ve svislém směru (A4Z) nejvýraznější frekvence okolo 50 Hz a poté mezi 150 Hz – 400 Hz. Na křídlové kolejnici v příčném směru (A6Y) jsou u výhybky č. 4 výrazné frekvence okolo 100 Hz, 200 Hz – 400 Hz a okolo 600 Hz. Na pražci jsou u výhybky č. 4 výrazné frekvence mezi 40 Hz až 50 Hz a poté okolo 90 Hz. Ve štěrkovém loži jsou u výhybky č. 4 výrazné frekvenční složky okolo 40 Hz – 50 Hz a 80 Hz – 1000 Hz. Z prvních přehledových grafů lze vyčíst, že některé frekvenční složky okolo 40 Hz a 80 Hz se u výhybky č. 4 posouvají k mírně vyšším frekvencím, což může být vyšší tuhostí uzlu upevnění. Také je patrné, že se zvyšující se rychlostí vlaků se klíčové frekvenční složky posouvají směrem k vyšším frekvencím.

12.5.2.1. Vyhodnocení ve frekvenční oblasti – Welchova metoda

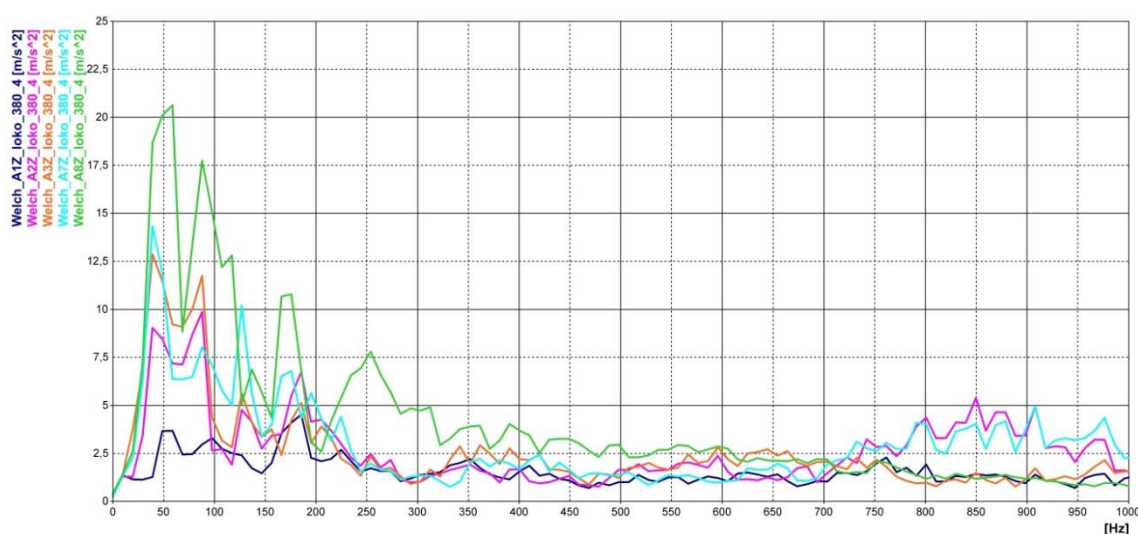
Pro podrobnější frekvenční analýzu jsem vybral ze skupiny změřených vlaků dvě srovnatelné soupravy (LEO Express a Pendolino) a lokomotivu řady 380, protože ty projížděly přes obě výhybky stejnou rychlostí a zároveň využily maximální traťové rychlosti. Ostatní vlaky projížděly pomaleji a mne zajímají především maximální dynamické účinky, které vyvolávají nejrychlejší vlaky. Pro prezentaci v textové části disertační práce jsem se rozhodl použít časový výřez odpovídající průjezdu lokomotivy řady 380, protože vyvolal největší dynamické účinky. Grafy pro ucelené jednotky Pendolino a LEO Express jsou v přílohách k měření v Ústí nad Orlicí. Průběhy jsou u těchto ucelených souprav podobné jako u lokomotivy řady 380, ale dosahují nižších hodnot zrychlení vibrací na klíčových frekvencích. Nejprve se budu věnovat roznosu zrychlení kmitání pražcem a poté přechodu vibrací z křídlové kolejnice do šterkového lože.

Na *Obr. 12.7* jsou spektra ze snímačů na pražci u výhybky č. 3 a na *Obr. 12.8* jsou spektra ze snímačů na pražci u výhybky č. 4. Na obou výhybkách jsou modrou barvou spektra pro snímač A1Z (za hlavou pražce v přímé větvi výhybky), fialovou pro snímač A2Z (v ose přímé větve výhybky), oranžovou je snímač A3Z (u srdcovky), tyrkysovou je snímač A7Z (v ose odbočné větve) a zelenou je snímač A8Z (za hlavou pražce v odbočné větvi výhybky). Na obou výhybkách mají průběhy spekter u snímačů ve středu pražce v přímé a odbočné větvi a u srdcovky (A2Z, A7Z a A3Z) prakticky stejné průběhy. Je to pravděpodobně způsobeno tím, že dynamický ráz na srdcovce výhybky se pražcem přenáší až do osy kolejí. Ve spektrech z těchto snímačů (A2Z, A7Z a A3Z) jsou dvě významné frekvenční špičky, první je na 40 Hz a druhá na 90 Hz, přičemž o něco vyšší hodnoty se vyskytují na výhybce č. 3. Spektrum ze snímače za hlavou pražce v odbočné větvi (A8Z) je u obou výhybek rovněž podobné. Spektrum (A8Z) má první vrchol na 60 Hz a druhý na 90 Hz, vyšší hodnoty u tohoto snímače pravděpodobně souvisí s tím, že odbočná větev není při průjezdu lokomotivy přímou zatížena a pražec je nadzvedáván a může volně kmitat. Vyšších hodnot dosahuje spektrum ze snímače A8Z na výhybce č. 4, což souvisí s většími pohyby pražce v tomto místě na výhybce č. 4. Za hlavou pražce v přímé (A1Z) jsou spektra na obou výhybkách velmi podobná s vrcholem okolo 50 Hz. Výše popsané děje jsou patrné i na vyhodnocení ucelených souprav (Pendolino a LEO Express), ale první výraznější frekvence je posunuta o 10 Hz výše u výhybky č. 4 a až o 20 Hz u výhybky č. 3, Frekvence na hlavě pražce v přímé (A1Z) je posunuta o 25 Hz. Tento fakt pravděpodobně souvisí s jiným odpružením vozidel a s nižší hmotností na nápravu u ucelených jednotek. Na soupravách Pendolino a LEO Express je vidět, že na výhybce č. 3 je první frekvenční vrchol (frekvence 40 Hz na lokomotivě) posunutý o 10 Hz níže než na výhybce č. 4 a to na 50 Hz. Tato skutečnost pravděpodobně souvisí s vyšší tuhostí uzlu upevnění u výhybky č. 4, ale může souviset i s vyššími pohyby pražce pod

srdcovkou u výhybky č. 3. Celkově lze konstatovat, že šíření vibrací pražcem je u obou konstrukcí velmi podobné. Vyšší hodnoty zrychlení kmitání dosahuje výhybka č. 3 na klíčových frekvencích okolo 50 Hz a 90 Hz, které pravděpodobně odpovídají teoretické síle P_2 .



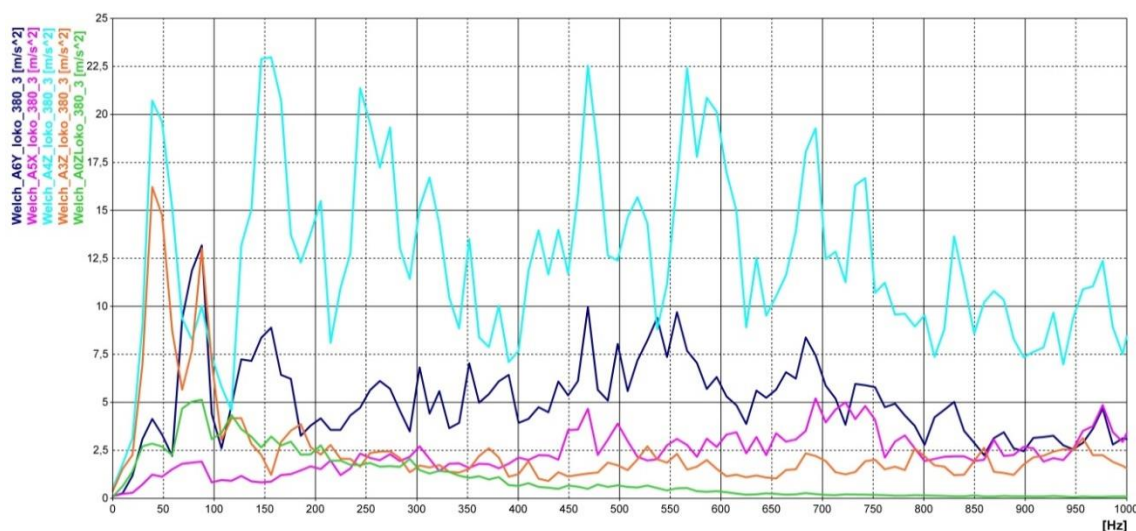
Obr. 12.7 Welchova metoda, pražec pod srdcovkou, lokomotiva řady 380, výhybka č. 3



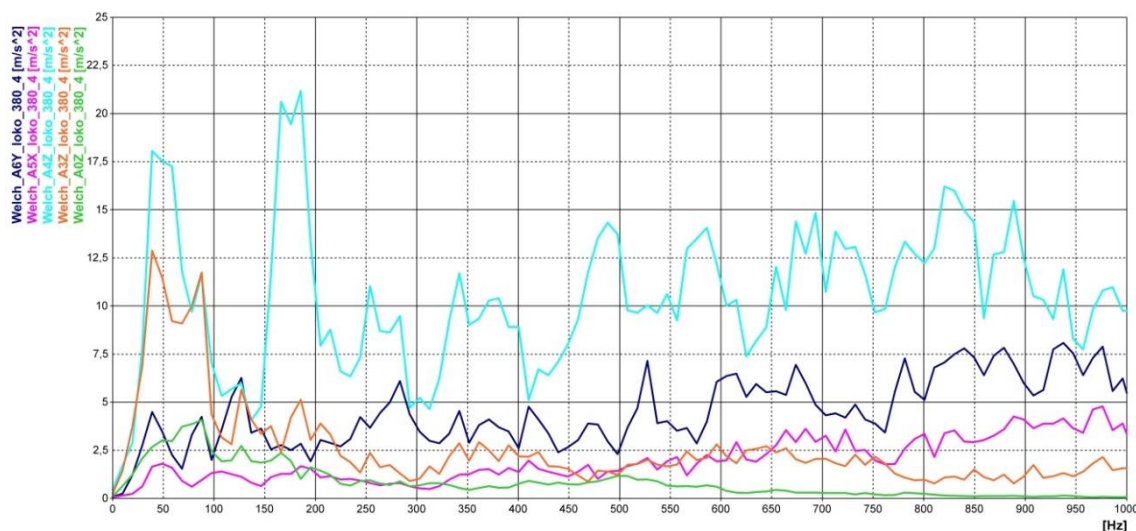
Obr. 12.8 Welchova metoda, pražec pod srdcovkou, lokomotiva řady 380, výhybka č. 4

Na dalších grafech je sledován přechod zrychlení vibrací z křídlové kolejnice do šterkového lože. Modrou barvou jsou spektra pro snímač A6Y (na křídlové kolejnici v příčném směru), fialovou pro snímač A5X (na křídlové kolejnici v podélném směru), oranžovou je snímač A3Z (u srdcovky na pražci), tyrkysovou je snímač A4Z (na křídlové kolejnici ve svislém směru) a zelenou je snímač A0Z (na tyči ve šterkovém loži). Na Obr. 12.9 jsou zobrazena frekvenční spektra pro výhybku č. 3 a na Obr. 12.10

jsou zobrazena frekvenční spektra pro výhybku č. 4. Na křídlové kolejnici ve svislém směru (A4Z) je patrný první frekvenční vrchol na obou konstrukcích okolo 40 Hz a je vyšší na výhybce č. 3. Další frekvenční vrchol u spektra ze snímače A4Z je na frekvenci okolo 150 Hz na výhybce č. 3 a na frekvenci okolo 175 Hz na výhybce č. 4. Zrychlení na této frekvenci už se do pražce téměř nepřenáší, takže se pravděpodobně jedná již o frekvenční složku odpovídající síle P_1 . Posunutí k vyšší frekvenci na výhybce č. 4 je i v tomto případě pravděpodobně ovlivněno vyšší tuhosti u této výhybky (tužší uzel upevnění, menší zatlačení pražců). Největší rozdíl mezi konstrukcemi je na křídlové kolejnici ve svislém směru (A4Z) v oblasti frekvencí mezi 200 Hz až 300 Hz a poté mezi 400 Hz až 600 Hz, což je v oblasti frekvencí, které dle teoretických předpokladů by mohly odpovídat dynamické síle P_1 . Tuto záležitost připisuji většímu ojetí srdcovky výhybky č. 3, což bylo zjištěno při měření společností DT - Výhybkárna a strojírna, a.s. dne 21. 5. 2015. Podstatný rozdíl mezi výhybkami byl zjištěn také na snímači v příčném směru na křídlové kolejnici (A6Y). Zde především na frekvenci okolo 90 Hz a 150 Hz jsou vyšší hodnoty na výhybce č. 3, což může značit nestabilitu chodu lokomotivy ve výhybce. Protože se tato frekvence objevuje i u Pendolina a LEO Expresu, usuzuji, že pravděpodobně vlakové soupravy vjíždí do výhybky č. 3 příčně rozkmitané, což by mohlo značit horší parametry geometrie koleje před, nebo ve výhybce.

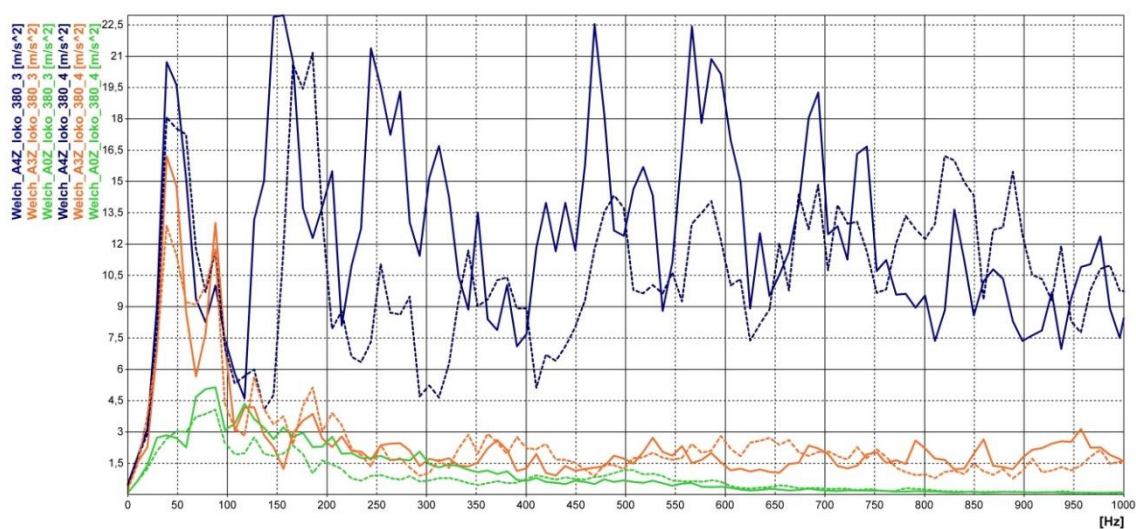


Obr. 12.9 Welchova metoda, přechod z křídlové kolejnice do štěrkového lože, lokomotiva řady 380, výhybka č. 3



Obr. 12.10 Welchova metoda, přechod z křídlové kolejnice do šterkového lože, lokomotiva řady 380, výhybka č. 4

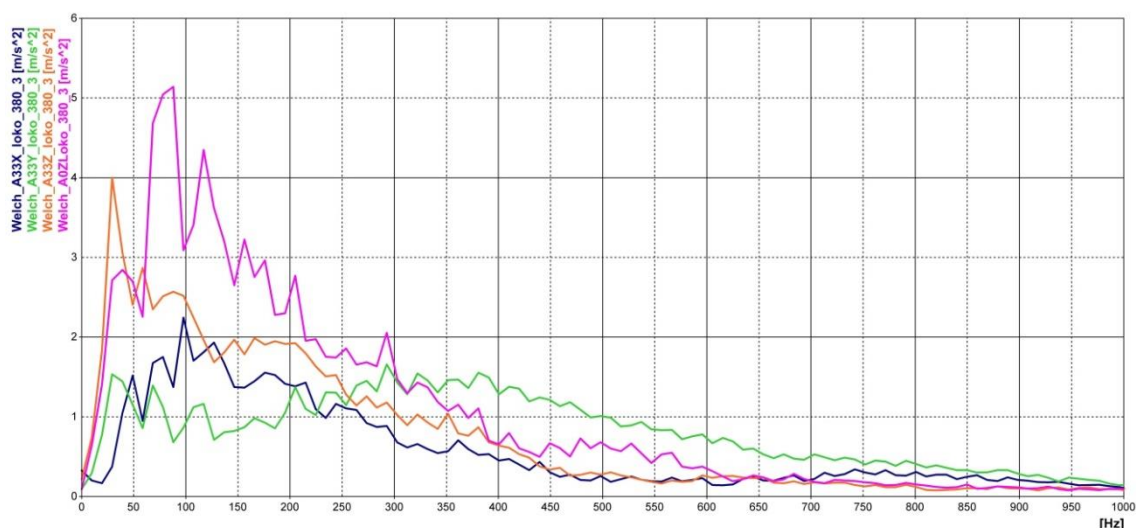
Na Obr. 12.11 je srovnání frekvenčních spekter získaných ze snímačů na přechodu z křídlové kolejnice do šterkového lože. Modrou barvou jsou spektra na křídlové kolejnici (A4Z), oranžovou barvou jsou spektra na pražci u srdcovky (A3Z) a zelenou barvou jsou spektra na tyči ve šterkovém loži (A0Z). Čárkovaně jsou spektra na výhybce č. 4 a plnou čarou jsou spektra na výhybce č. 3. Jak je vidět vyšší hodnoty jsou na všech snímačích na výhybce č. 3. Zrychlení kmitání odpovídající frekvenčně dynamické síle P_2 je na obou výhybkách tlumeno podobně, zde se tedy výhoda větší pružnosti uzlu upevnění TA3718 nepotvrdila.



Obr. 12.11 Welchova metoda, srovnání na přechodu z křídlové kolejnice do šterkového lože, lokomotiva řady 380, výhybka č. 3 a 4

Na Obr. 12.12 jsou frekvenční spektra získaná ze snímačů ve šterkovém loži na výhybce č. 3 a na Obr. 12.13 jsou frekvenční spektra ve šterkovém loži na výhybce č. 4.

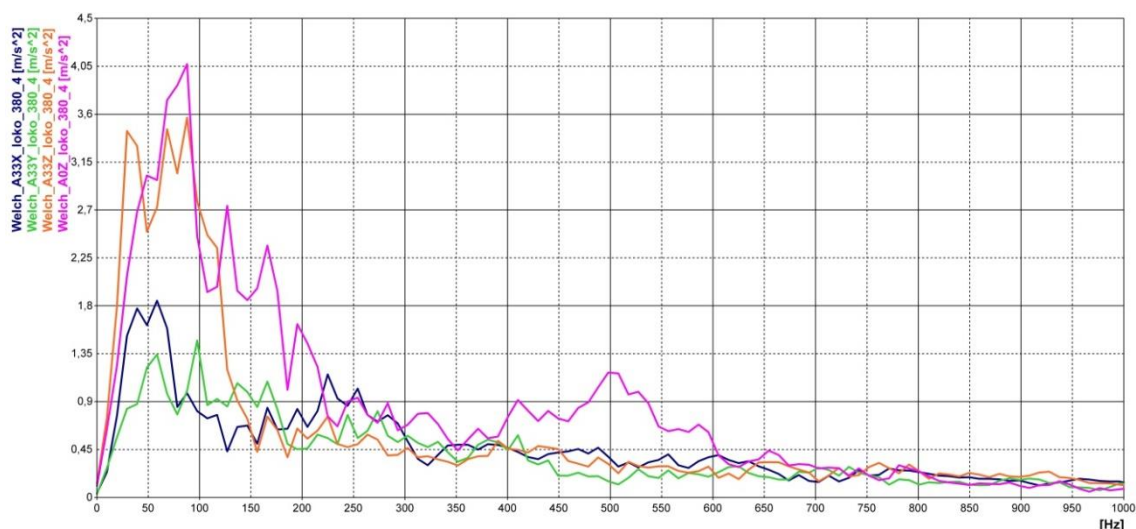
Fialovou barvou je spektrum ze snímače na měřicí tyči (A0Z), která je zapuštěna do šterkového lože, další barvy jsou pak z tříosého snímače ve šterkovém loži. Modrou je podélný směr (A33X), zelenou je příčný směr (A33Y) a oranžovou je svislý směr (A33Z). Jak je z grafů patrné, ve šterkovém loži je nejvýraznější svislý směr a to na obou výhybkách, což odpovídá i teoretickým předpokladům. Dále je patrné, že spektrum ze snímače na tyči ve šterkovém loži je v oblasti frekvencí nad cca 100 Hz zcela jiné. Vysvětlují si to tím, že část tyče, která není zatlučena do šterkového lože, může volně kmitat a to se projevuje zvláště ve frekvencích nad 100 Hz. Na obou konstrukcích je ve svislém směru na snímači ve šterkovém loži výrazná frekvence okolo 35 Hz. Frekvence 35 Hz je přitom právě frekvence, kterou využívají pracovní stroje jako podbíječky a vibrátory kolejového lože, protože jedná o vlastní frekvenci šterkového lože. Je tedy možné, že šterkové lože bude vlivem dynamických účinků na srdcovce výhybky degradovat a měnit svůj tvar. Doporučuji proto další měření na výhybkách č. 3 a 4, aby mohla být tato hypotéza potvrzena, nebo vyvrácena.



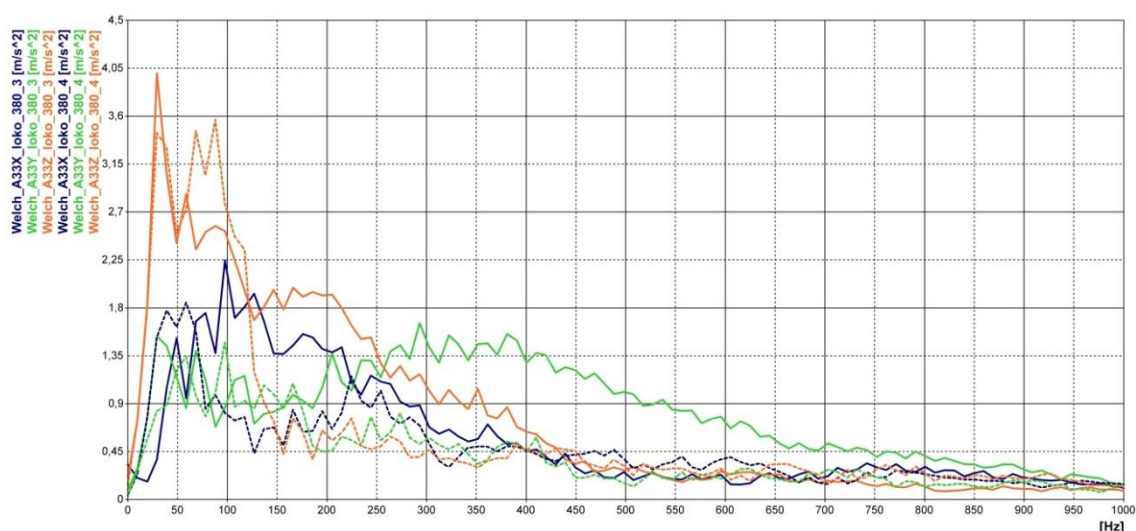
Obr. 12.12 Welchova metoda, šterkové lože – srovnání, lokomotiva řady 380, výhybka č. 3

Na Obr. 12.14 je srovnání frekvenčních spekter ze snímačů v měřicím kameni ve šterkovém loži, jak je vidět, tak průběh frekvenčního spektra ve svislém směru je na obou konstrukcích podobný, ale odlišnosti zde jsou. Hlavní rozdíl je v tom, že v oblasti frekvencí mezi 50 Hz a 100 Hz jsou vyšší hodnoty zrychlení kmitání na výhybce č. 4, zatímco v oblasti frekvencí od 125 Hz do 250 Hz jsou vyšší hodnoty zrychlení kmitání na výhybce č. 3. Z výše uvedeného lze vyslovit hypotézu, že frekvence mezi 50 Hz a 100 Hz jsou výraznější na výhybce č. 4, protože má tužší uzel upevnění a zrychlení na frekvencích, které odpovídají dynamické síle P_2 se tak lépe přenáší až do šterkového lože. Vyšší hodnoty zrychlení kmitání v oblasti frekvencí od 125 Hz do 250 Hz na výhybce č. 3 připisují většímu ojetí srdcovky u této výhybky, což bylo zjištěno při

měření společností DT - Výhybkárna a strojírna, a.s. dne 21. 5. 2015. Díky tomu je na výhybce č. 3 vyšší zrychlení na frekvencích, které by mohly odpovídat síle P_1 .



Obr. 12.13 Welchova metoda, šterkové lože – srovnání, lokomotiva řady 380, výhybka č. 4



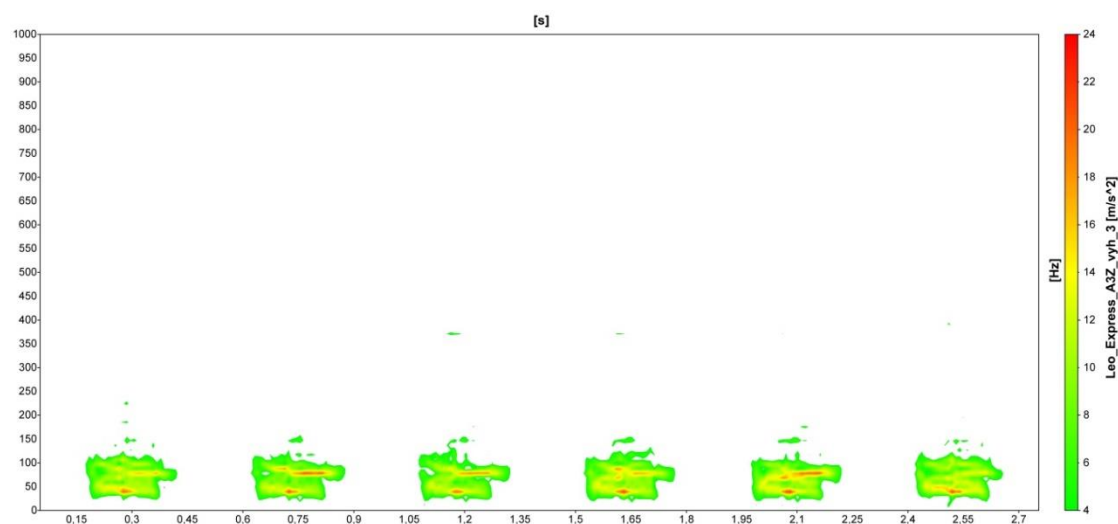
Obr. 12.14 Welchova metoda, šterkové lože – srovnání – měřicí kámen, lokomotiva řady 380, výhybka č. 3 a 4

12.5.3. Vyhodnocení v časově-frekvenční oblasti – STFT

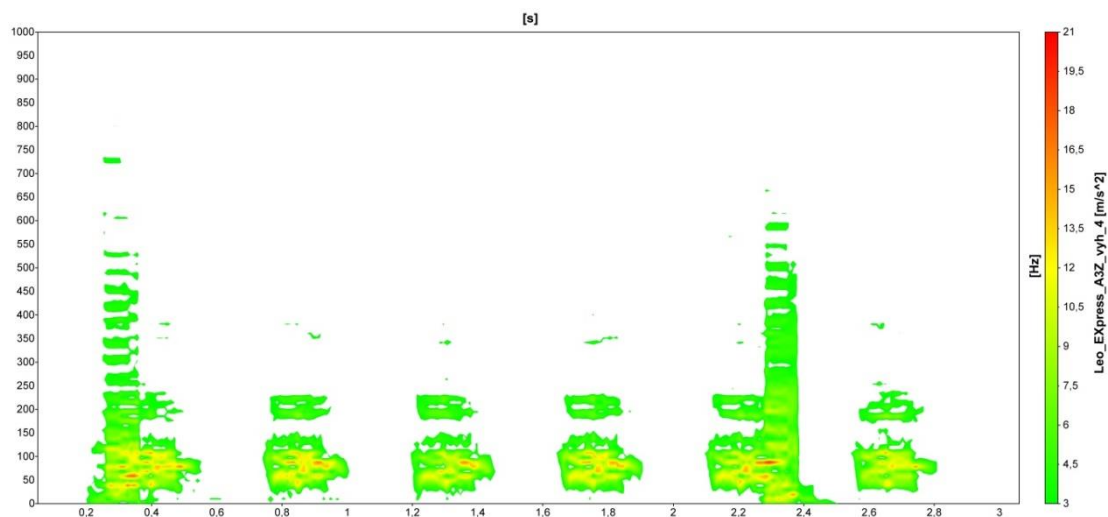
Pro porovnání v časově-frekvenční rovině jsem do této části disertační práce vybral jednotky LEO Express. Pro ně jsem vypočítal STFT a zpracoval hustotní spektrogram (spektrogramy jsou součástí přílohy měření v Ústí nad Orlicí, kde jsou i přehledněji vyobrazeny na celou stranu). Na hustotním spektrogramu je na ose x čas na ose y frekvence a barevná stupnice určuje velikost zrychlení na jednotlivých frekvencích. Důvodem výběru souprav LEO Express je to, že tyto jednotky projížděly přes měřené místo naprosto stejnou rychlostí. Opět se ukazuje, že časová lokalizace klíčových

frekvenčních složek odpovídá průjezdu jednotlivých podvozků (náprav) vlaku a působení jednotlivých náprav se může lišit. Jinak lze říci, že časově-frekvenční analýza potvrdila závěry z analýzy frekvenční. V přílohách měření v Ústí nad Orlicí jsou hustotní spektrogramy soupravy LEO Express na snímačích A4Z, A3Z a A0Z pro obě výhybky. Vybral jsem signály, které popisují přechod zrychlení kmitání z křídlové kolejnice do pražce a šterkového lože, protože na této analýze je vidět jak dynamický ráz od vlakových souprav prochází konstrukcí. Pro prezentaci v textové části disertační práce jsem vybral signály ze snímače A3Z, na něm by se mělo projevit pozitivní působení uzlu upevnění TA3718.

Na Obr. 12. 15 je hustotní spektrogram pro výhybku č. 3 a na Obr. 12.16 je hustotní spektrogram pro výhybku č. 4. Z hustotních spektrogramů je zřejmé, že zrychlení na klíčových frekvencích je u obou výhybek podobné. O něco málo vyšší hodnoty jsou na výhybce č. 3. Klíčové frekvenční pásmo je u obou výhybek mezi 35 Hz až 110 Hz se špičkami v oblasti 40 Hz a 75 Hz, což jsou zrychlení kmitání na frekvencích, které pravděpodobně odpovídají dynamické síle P_2 . Ani zde se neprojevuje očekávaný přínos uzlu upevnění TA3718 na výhybce č. 3.



Obr. 12.15 STFT, na pražci u srdcovky výhybky č. 3



Obr. 12.16 STFT, na pražci u srdcovky výhybky č. 4

12.6. Celkové vyhodnocení měření v Ústí nad Orlicí

Z hlediska pohybového chování pražců po délce srdcovky jsou na tom obě výhybky velmi podobně. Jen je maximální hodnota zatlačení u výhybky č. 3 pod hrotem srdcovky a u výhybky č. 4 je to o jeden pražec dále. Kola vlaku přechází z hrotu srdcovky na křídlovou kolejnici někde mezi snímači S1 a S4 a z tohoto pohledu lze říci, že jsou obě konstrukce porovnatelné. Pražec pod hrotem srdcovky na výhybce č. 4 se při průjezdu vlaku naklání a za hlavou pražce se to projevuje zdvihy.

Na křídlové kolejnici je díky menší tuhosti uzlu upevnění vyšší zatížení u výhybky č. 3, to se projevuje jak na časovém vyhodnocení, tak ve frekvenční rovině. Na křídlové kolejnici (A4Z) v oblasti frekvencí mezi 200 Hz až 300 Hz a poté mezi 400 Hz až 600 Hz, což je v oblasti frekvencí, které dle teoretických předpokladů by mohly odpovídat dynamické síle P_1 . Tuto záležitost připisují většímu ojetí srdcovky výhybky č. 3, což bylo zjištěno při měření společností DT - Výhybkárna a strojárna, a.s. dne 21. 5. 2015. Z hlediska vyhodnocení měřicích míst na pražci jsou obě konstrukce porovnatelné, ale mírně vyšších hodnot dosahuje výhybka č. 3. Především v oblasti frekvencí okolo 40 Hz až 75 Hz, které by mohly odpovídat dynamické síle P_2 . Tuto skutečnost připisují větším pohybům pražce přímo pod hrotem srdcovky u výhybky č. 3. Ve šterkovém loži jsou obě konstrukce srovnatelné, nicméně o něco větších hodnot dosahuje výhybka č. 4, především v oblasti frekvencí mezi 50 Hz a 100 Hz, které odpovídají dynamické síle P_2 . Do šterkového lože se tedy u výhybky č. 4 přenese o něco více dynamického zatížení.

Celkově je možné říci, že pozitivní účinky uzlu upevnění TA3718 u výhybky č. 3 se nijak výrazně neprojevují, může to být i tím, že zatímco výhybka č. 4 byla dva měsíce před měřením podbita, tak výhybka č. 3 nikoliv. Není jisté, zda tento opravný zásah ovlivnil výsledky měření, a proto doporučuji měření opakovat. Bohužel to není poprvé, co takovýto bezprecedentní zásah ovlivnil zkušební úsek a výsledky měření.

Doporučuji, aby pro správu zkušebních úseků byl na SŽDC vyčleněn pracovník, který bude koordinovat i povolovat veškeré opravné a údržbové práce ve zkušebních úsecích a byl zaveden tvrdý sankční režim pro nepovolené práce.

Metodika měření a matematické postupy ve fázi vyhodnocení výsledků dokáží velmi dobře popsat chování výhybky pod zatížením. Lze zjistit skutečnosti, které pouhým měřením měřicím vozem, měřicím vozíkem KRAB, nebo při měření geodetickém (měření absolutní polohy koleje) není možné zjistit. Už po zkušenostech z měření v Chocni jsem navrhl využít z metodiky čtyři čidla A4Z, A3Z, A5X a A1Z pro diagnostiku výhybkových konstrukcí. Domnívám se, že i jedno jediné čidlo umístěné na křídlové kolejnici (A4Z) stacionárně by mohlo pomoci při optimalizaci údržby. Z časového vyhodnocení je možné zjistit, zda se zhoršuje geometrie přechodu ve výhybce a z frekvenční analýzy můžeme usuzovat, jak se zrychlení kmitání na jednotlivých frekvencích mění a z toho predikovat velikosti dynamických sil P_1 a P_2 . Zvyšující se zrychlení vibrací na frekvencích odpovídajících síle P_2 (35 Hz – 150 Hz) může znamenat horší podepření výhybky, zatímco zvýšení vibrací na frekvencích odpovídajících síle P_1 (150 – 600 Hz) může znamenat větší ojetí srdcovky výhybky. Hranice frekvenčního působení síly P_1 a P_2 samozřejmě není pevná a může se posouvat v závislosti na tuhosti uložení výhybky, v závislosti na vlastnostech vozidel (hmotnost na nápravu a odpružení) a rychlosti vlaků. Pokusil jsem se z několika realizovaných měření stanovit široký frekvenční rozsah (pro zrychlení kmitání, která odpovídají silám P_1 a P_2), který by měl platit pro velkou část výhybek v hlavních kolejích.

13. Závěr

Jednotnou metodikou měření bylo provedeno 8 experimentálních měření (pouze v Poříčanech z provozních důvodů nebylo možné z hlediska bezpečnosti měřit pohybové chování konstrukce). Další měření, která v disertační práci nejsou, sloužila k ověření metodiky měření a předcházela návrhu metodiky, tak jak byla použita na pozdějších měřeních. Celkově se ukazuje, že experimentální měření na hlavních koridorových tratích s rychlostí až $160 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ je organizačně velmi složité zajistit. Je třeba mít k dispozici dostatečné množství vyškolených pracovníků, kteří mají právo vstupu na provozovanou železniční dopravní cestu. Měření je třeba plánovat alespoň měsíc předem, neboť musí být nahlášena odpovědným pracovníkům SŽDC a dána na vědomí přednostovi dané správy tratí a vedoucímu provozního oddělení. Měření musí být následně SŽDC odsouhlaseno. Musí se sejít vhodné klimatické podmínky pro měření. Také nesmí být na trati výluka a pomalé jízdy vlaků. Skloubit všechny podmínky dohromady být někdy manažersky velmi problematické. Bez vstřícného jednání vedoucího práce prof. Smutného, pracovníků SŽDC, výpravčích ve stanicích, mých kolegů z Ústavu železničních konstrukcí a staveb a mého zaměstnavatele Výzkumného Ústavu Železničního, a.s. by měření nebylo možné realizovat. Chtěl bych všem ještě jednou na tomto místě poděkovat. I přes velké úsilí se některá plánovaná měření nepodařilo realizovat, zvláště v žst. Ústí nad Orlicí jsem plánoval další měření jak na výhybkách č. 3 a 4, tak na výhybkách č. 7 a 8, kde jsou vloženy podpražcové podložky. Stavba a vložení výhybek se však natolik zpozdilo, že měření nepodařilo realizovat a zahrnout do disertační práce. Měření realizována budou a na jejich organizaci a vyhodnocení se budu rád podílet. Výsledky měření budou v blízké době publikovány v odborných periodikách. Další část je věnována shrnutí realizovaných měření z hlediska naplnění cílů práce.

13.1. Studium dynamických dějů ve výhybce

Z realizovaných 8 experimentálních měření na 6 výhybkách lze obecně popsat chování výhybky pod zatížením projíždějícími vlaky. Lze říci, že se zhoršující se geometrií přechodu v srdcovce výhybky se zvětšují i dynamické účinky od projíždějících vlakových souprav. To se projevilo na všech měřeních. Geometrii přechodu vyjádřenou zjednodušeně úhlem α (popsáno v kapitole 2 a 4) ovlivňuje především ojetí srdcovky a kvalita podepření výhybky. To se projevilo na měřeních v Chocni, Poříčanech i v Ústí nad Orlicí. Z proběhlých měření lze stanovit dva hlavní mechanismy, jak dochází k rozpadu geometrie přechodu. Prvním je zhoršování tzv. shora. Tím je myšleno, že s rostoucím ojetím srdcovky výhybky rostou i dynamické účinky od kol vlaků, které se přenáší ze srdcovky do pražce a do šterkového lože. Pražec na styku s kolejovým ložem namáhá hrany kameniva kolejového lože a pod pražcem u srdcovky se postupně vytvoří volné prostory. Při průjezdu kol vlaku je pak pražec zatlačován na šterk. Pod tímto

zatížením je šterkové lože stále více namáháno a zatlačení pražce se zvětšují. S větším zatlačováním pražce pod hrotem srdcovky a v jeho okolí se zároveň mění i úhel α a tím se dynamické účinky zvětšují. Druhým mechanismem je zhoršování tzv. odspodu. To je možné pozorovat především na měřeních v Chocni. Nízká deformační odolnost konstrukce železničního spodku způsobí větší zatlačování pražců, čímž se změní úhel α a zvětší se dynamické zatížení srdcovky od kol vlaku, zrychlí se tak ojíždění srdcovky a celý proces se zrychluje a dynamické účinky neustále narůstají.

Dynamický ráz se ze srdcovky výhybky přenáší přes pražec až do šterkového lože. Chování pražce pod srdcovkou lze zobecnit tak, že největší namáhání jsou přímo u srdcovky výhybky a od tohoto místa namáhání pražce postupně klesá. To se projevilo jak ve vyhodnocení zrychlení vibrací, tak ve vyhodnocení zatlačení pražců, kdy pražec vytváří průhybovou křivku podobnou prostě uloženému nosníku. Výjimkou byl pouze pražec pod srdcovkou výhybky č. 4 v Ústí nad Orlicí. Chování pražců podél srdcovky výhybky je vlastně velmi podobné, což dokládá měření v Ústí nad Orlicí. Největší zatlačení jsou opět v místě největších dynamických účinků. V Chocni zatlačení pražců postupně narůstala i za místem, kde je teoreticky největší dynamické namáhání, tedy na pražci přímo pod hrotem srdcovky. U obou konstrukcí to však bylo směrem do spojky, při jedné obhlídce místa měření bylo právě mezi výhybkami č. 59 a 63 objeveno místo, kde bylo šterkové lože na první pohled mnohem více vlhké, je tedy možné, že zde systém odvodnění nefunguje optimálně, což se mohlo projevit i na měření ve výhybkách.

Měření v Poříčanech prokázala přínos uzlu upevnění s vulkanizovanými podložkami na snížení dynamického rázu působícího na srdcovku výhybky. Lze konstatovat, že uzel upevnění s vulkanizovanými podložkami nejen lépe tlumí dynamické namáhání, ale také snižuje namáhání okolních pražců. To se potvrdilo jak v časové, tak ve frekvenční analýze. Z frekvenčního hlediska byl jednoznačně vidět posun frekvencí spojených s dynamickým namáháním směrem k vyšším hodnotám u výhybky č. 1 (s klasickým uzlem upevnění), což je znak vyšší tuhosti u této konstrukce. Tento závěr vychází z teoretických studií, které jsou zmíněny v kapitole 4. Výsledky korespondují i se zkušenostmi z údržby, kdy výhybka č. 10 (s vulkanizovanými podložkami) je vnímána jako bezproblémová pro provoz a nevykazuje od svého vložení žádné problémy.

Z měření v Ústí nad Orlicí vyplývá, že pozitivní účinky uzlu upevnění TA3718 u výhybky č. 3 se nijak výrazně neprojevují. Může to být i tím, že zatímco výhybka č. 4 byla dva měsíce před měřením podbita, tak výhybka č. 3 nikoliv. Není jisté, zda tento opravný zásah ovlivnil výsledky měření, a proto doporučuji měření opakovat.

V dalších odstavcích se budu podrobněji věnovat chování výhybky pod zatížením, jak je zachytila jednotlivá čidla z aplikované metodiky měření. V popisu budu postupovat stejně, jako se postupně šíří dynamická energie od projíždějících vlakových souprav ze

srdcovky výhybky, tedy od křídlové kolejnice přes pražec až po šterkové lože. Závěry jsou podpořeny měřením a následnou analýzou změřených dat.

Z tříosého snímače na křídlové kolejnici lze predikovat kvalitu geometrie přechodu. Na všech měřeních se prokázalo, že výhybka s kvalitnější geometrií přechodu má celkově menší zrychlení vibrací především ve svislém směru. Z frekvenčního hlediska se zhoršující ojetí srdcovky projevuje (ve svislém směru) především zvýšením zrychlení kmitání v oblasti frekvencí odpovídajících dynamické síle P_1 (200 Hz až 600 Hz). Tato skutečnost je patrná na měření v Poříčanech, Chocni i v Ústí nad Orlicí. Se zvyšujícím se zatlačením pražců se na křídlové kolejnici (ve svislém směru) tato záležitost projevuje zvýšením zrychlení kmitání v oblasti frekvencí odpovídajících dynamické síle P_2 (35 Hz – 150 Hz). Přičemž se zvýšením zatlačení pražců se tato skutečnost projeví i v oblasti frekvencí 75 Hz až 250 Hz, tedy někde na pomezí frekvencí, které by mohly odpovídat rozhraní mezi silami P_2 a P_1 . Přesnou hranici mezi těmito silami je těžké stanovit, záleží na celkové tuhosti uložení konstrukce, hmotnosti na nápravu a odpružení vozidel a na rychlosti vlaků. Zhroucení geometrie přechodu se projeví i na zrychlení kmitání v podélném směru, které se celkově zvýší. Ve frekvenční oblasti se to poté projeví v oblasti nízkých frekvencí do 10 Hz a poté v oblasti frekvencí mezi 100 Hz až 250 Hz i v oblasti frekvencí nad 250 Hz, což je vidět na vyhodnocení měření v Chocni. Zvýšení hodnot zrychlení kmitání v příčném směru pravděpodobně znamená, že vozidla výhybku projíždějí příčně rozkmitaná. Ve frekvenčním spektru se to projeví především zvýšením zrychlení vibrací na frekvencích okolo 80 Hz a 150 Hz, patrné je to na vyhodnocení měření v Ústí nad Orlicí.

Na pražci u srdcovky se dynamické zatížení a zatlačení pražce nejvíce projeví v oblasti frekvencí 35 Hz až 150 Hz, tedy v oblasti frekvencí, které pravděpodobně odpovídají síle P_2 , u které se již změna hybnosti přenáší na celý systém a zatěžuje srdcovku výhybky ohybovým napětím a pražec tím stlačuje. Čím větší jsou zatlačení pražce, tím více se to projevuje především na zvýšení zrychlení kmitání v oblasti frekvencí mezi 75 Hz až 150 Hz. Tato skutečnost je patrná na měření z Chocně, tak na měření z Ústí nad Orlicí. Dynamický ráz se přenáší pražcem do osy přímé i odbočné větve a frekvenční složení spektra na snímačích v těchto místech prakticky kopíruje frekvenční složení spektra na snímači přímo u srdcovky výhybky. Na pražci za hlavou v přímé koleji se dynamický ráz neprojevuje, protože tento pražec je zatěžován druhým kolem projíždějícího dvojkolí vlaku. Z frekvenčního hlediska jsou zde klíčové frekvence okolo 50 Hz až 100 Hz, ale zrychlení na těchto frekvencích je několikanásobně nižší, než je tomu u snímačů v osách kolejí a zejména u pražce pod srdcovkou. Pravděpodobně to bude tím, že je zde pražec mnohem méně zatlačován a především zde nepůsobí dynamický ráz. Za hlavou pražce v odbočné větvi výhybky se ve frekvenčním spektru projevuje, že pražec zde není zatížen a může volně kmitat. Čím větší jsou pohyby pražce v tomto místě, tím vyšší jsou zrychlení vibrací na frekvencích

mezi 35 Hz až 150 Hz, je to patrné především na měření v Ústí nad Orlicí. Souvisí to pravděpodobně s tím, že jak není pražec v tomto místě zatěžován, mohou se frekvenční složky odpovídající dynamické síle P_2 volně šířit pražcem a někdy nabývají i vyšších hodnot, jako v místě, kde je pražec zatížen podvozky vlaku.

Pro měření vibrací ve šterkovém loži jsem u všech měření použil měřicí tyč, která sloužila jako vlnovod a umožňuje přenos vibrací ze šterku až do snímače zrychlení. Ukazuje se, že ve šterkovém loži jsou nejvýraznější zrychlení na frekvencích mezi 35 Hz až 150 Hz, tedy zrychlení na frekvencích, které pravděpodobně odpovídají dynamické síle P_2 , která se přenáší až do šterkového lože. Se zhoršující se geometrií přechodu se zvyšují i zrychlení ve šterkovém loži na klíčových frekvencích a především v oblasti kolo 100 Hz, jak prokázalo měření v Chocni. Pokud jsou zatlačení příliš velká, tak pražec pravděpodobně již zcela nedosedá na šterkovou vrstvu, což se projevilo i v poklesu zrychlení vibrací ve šterkovém loži, dobře je to vidět především na měření v Chocni. Na měření v Ústí nad Orlicí se prokázalo, že měření ve šterkovém loži pomocí měřicí tyče, dává poměrně objektivní výsledky, ale v oblasti frekvencí nad 100 Hz již neodpovídá zrychlením, která byla naměřena pomocí měřicího kamene přímo ve šterkovém loži. Tento fakt je způsoben tím, že volný konec měřicí tyče, který není zatlučen do šterkového lože, může volně kmitat, což se projevuje právě na vyšších frekvencích. Měření pomocí měřicích kamenů ukazuje, že ve šterkovém loži jsou klíčové frekvenční složky mezi 35 Hz až 100 Hz. Frekvenční špičky se objevují okolo 35 Hz, 60 Hz a 85 Hz. Zvláště frekvence okolo 35 Hz je přitom právě frekvence, kterou využívají pracovní stroje jako podbíječky a vibrátory kolejového lože, protože jedná o vlastní frekvenci šterkového lože.

13.2. Metodika měření

Navržená a použitá metodika měření, tak jak je popsána v kapitole 6, se stala základem certifikované metodiky měření dynamických účinků. Metodika získala certifikaci od Ministerstva dopravy a jsem jejím spoluautorem. Na měřeních se prokázalo, že metodika měření je spolu s použitým matematickým aparátem schopna velmi dobře popsat chování konstrukce z hlediska dynamických účinků. Zvolená metodika měření dává dostatečně přesné výsledky a je možné ji použít opakovaně. Díky navržené metodice měření lze také velmi dobře porovnat různá konstrukční řešení, což se projevilo na měření v Poříčanech a Ústí nad Orlicí. Pomocí použité metodiky měření lze také sledovat efektivitu opravných zásahů ve výhybce, což se prokázalo na měření v Chocni. Metodika měření, tak jak byla použita, se díky certifikaci Ministerstva dopravy bude používat i nadále u všech nových konstrukcí, které budou ve zkušebním provozu. Pro měření v Ústí nad Orlicí byl optimalizován tzv. vztažný (srovnávací) bod. Místo rámu, který tvoří dvě ocelové délky 80 cm a průměru 20 mm zatlučené do kolejového lože a ocelový nosník délky 64 cm, který je připevněn k ocelovým tyčím, byla použita jen jedna tyč délky 80 cm a průměru 20 mm zatlučená do kolejového lože.

K této tyči byl navržen a následně vyroben speciální držák, který drží snímač dráhy. Toto řešení se ukázalo jako stabilnější a instalace snímačů dráhy se tím velmi zrychlila. Tím se zvětšila možnost použití metodiky měření pohybového chování konstrukce výhybky i v místech, kde jsme ji kvůli bezpečnosti raději nepoužili (např. Poříčany). Nový způsob upevnění snímače je vidět na fotodokumentaci, která je součástí příloh pro měření v Ústí nad Orlicí.

Měření pomocí měřicích kamenů funguje zcela bez problémů. Z použitých snímačů lze relativně jednoduše zjistit, zda se snímač natočil a případně nakolik, neboť umí měřit tíhové zrychlení. Nicméně vhodnou instalací lze dosáhnout toho, že natočení snímače je minimální. Instalované snímače na obou výhybkách dobře drží pozici, dokonce i po podbíjení u výhybky č. 4. Doporučuji jejich použití i u dalších zkušebních úseků.

Pro hodnocení údržbových prací navrhuji použít úspornější metodiku měření, založenou pouze na měření zrychlení vibrací. Základem je použití čtyř snímačů. Je tomu tak proto, že je na trhu velké množství malých ústředů a měřicích karet, které jsou vybaveny čtyřmi měřicími kanály. Prvním vybraným snímačem by byl svislý směr na křídlové kolejnici (A4Z). Z dat z tohoto snímače je možné vyhodnotit velikost zrychlení na frekvencích, které dle mého názoru a realizovaných měření odpovídají dynamickým silám P_1 a P_2 a tím je možné v podstatě odhadnout míru dynamického zatížení srdcovky výhybky. Také z časového vyhodnocení minim a maxim, případně plochy pod klouzavou RMS lze říci, jestli se kontaktní geometrie na přechodu z křídlové kolejnice na hrot srdcovky zlepšuje, či nikoliv. Druhým vybraným je snímač v podélném směru na křídlové kolejnici (A5X). Jak se ukázalo, tak v časové i ve frekvenční rovině se zhroucení geometrie přechodu projeví právě na tomto snímači, protože čím větší je úhel α (popsaný v kapitole 2), tím větší část dynamické energie se přenesla do podélného směru. Třetím snímačem je snímač na pražci u srdcovky (A3Z). Z tohoto snímače je možné zjistit, jaké frekvenční složky se do pražce přenášejí a odhadnout tak kvalitu podepření pražce. Protože se ukázalo, že především rozdíl ve zrychleních na frekvenci okolo 100 Hz na pražci u srdcovky (A3Z) a na hlavě pražce v přímém směru (A1Z) má spojitost se zatlačením pražce, tak je vhodné použít i snímač A1Z. Z těchto 4 snímačů je možné získat relativně celistvé informace, které dle mého názoru mohou ohodnotit například vliv údržbových prací na dynamické účinky na srdcovce výhybky.

Pro kontinuální (stacionární) měření navrhuji využít buď výše uvedenou metodiku, nebo ještě úspornější variantu s jen jedním čidlem. Domnívám se, že i jedno jediné čidlo umístěné na křídlové kolejnici (A4Z) stacionárně (trvale) by mohlo pomoci při optimalizaci údržby. Z časového vyhodnocení je možné zjistit, zda se zhoršuje geometrie přechodu ve výhybce a z frekvenční analýzy můžeme usuzovat, jak se zrychlení kmitání na jednotlivých frekvencích mění a z toho predikovat velikosti dynamických sil P_1 a P_2 . Zvyšující se zrychlení vibrací na frekvencích odpovídajících

síle P_2 (35 Hz – 150 Hz) může znamenat horší podepření výhybky, zatímco zvýšení vibrací na frekvencích odpovídajících síle P_1 (150 – 600 Hz) může znamenat větší ojetí srdcovky výhybky.

13.3. Matematický aparát

Matematický aparát se při zpracování změřených dat osvědčil. V časové oblasti minima a maxima poskytnou možnost indikace imperfekcí na nápravě, nebo kole vlaku. Současně umožní získání informací o maximálních špičkových hodnotách zrychlení vibrací a tedy i přeneseně o síle na kontaktu kolo-kolejnice. Velmi perspektivní je metoda klouzavé RMS, především plocha pod křivkou klouzavé RMS. Lze tak srovnat dynamické účinky jednotlivých vlaků a současně tato metoda poskytuje i přibližnou informaci o projeté zátěži z hlediska dynamických účinků na konstrukci výhybky. Protože analýza v časové rovině je k určení dynamických dějů na srdcovce výhybky nedostatečná, je velmi důležité zjistit, na kterých klíčových frekvencích se zrychlení kmitání realizuje. Pro vyhodnocení ve frekvenční rovině se velmi osvědčila Welchova metoda, která umožní vhodným průměrováním zjednodušit frekvenční spektrum a klíčové frekvence jsou lépe rozpoznatelné. Pro analýzu a zobrazení několika spekter do jednoho grafu je to velmi výhodná metoda. Časově-frekvenční analýza pomocí krátkodobé (okénkové) Fourierovi transformace dokáže ohodnotit působení jednotlivých náprav vlaku tím, že dokáže časově lokalizovat frekvenční špičky.

Na základě analýzy změřených dat doporučuji dále studium možností automatického zpracování dat. Pro automatické zpracování dat v časové rovině bych doporučoval pracovat s plochou pod křivkou klouzavé RMS, která odpovídá energetickému působení dynamického zatížení na srdcovku výhybky. Dále je nutné vyjádření frekvenčního spektra několika číselnými údaji tak, aby bylo možné využít pokročilých metod hodnocení např. umělé inteligence. Pro automatické zpracování dat ve frekvenční rovině bych doporučoval využití rychlé Fourierovi transformace, především z důvodu, že je založena pouze na změřených datech. Ve výše stanovených frekvenčních intervalech odpovídajících silám P_1 a P_2 , bych doporučoval využití například energetického součtu, který se využívá v akustice, tím by bylo možné dle mého názoru lépe vystihnout vliv frekvenčních špiček. Energetickým součtem prakticky zvýrazníme maximální špičkovou hodnotu a hodnoty nižší budou mít pouze malý význam a nebudou již maximální hodnotu tolik zvyšovat. Dále bych doporučoval výpočet těžiště plochy ve frekvenčních intervalech. Z velikosti součtů zrychlení kmitání v intervalech odpovídajícím plochám sil P_1 a P_2 by bylo možné zjistit ekvivalent jejich hodnoty. Poloha těžiště může zase naznačovat pohyb klíčových složek ve frekvenčním spektru. Z analýzy změřených dat bylo zjištěno, že čím vyšší jsou hodnoty na frekvencích v oblasti frekvencí 75 Hz až 250 Hz, tím vyšší jsou zatlačení pražců.

13.4. Hodnocení efektivity údržbových prací

Pro hodnocení údržbových prací doporučuji využít úspornější metodiku s využitím pouze čtyř čidel zrychlení vibrací, jak je uvedeno výše. Parametry metodiky jsou nadefinovány tak, aby měření mohla provést jakákoli odborná firma, která se měřením vibrací zabývá. Měření dynamických účinků doporučuji provést před opravným zásahem a po opravném zásahu. Pro srovnání stavu před a po opravě doporučuji z měřených signálů vybrat časové úseky odpovídající průjezdu lokomotiv. Lokomotivy vyvolávají nejvyšší dynamické účinky. Mezi lokomotivami jedné řady jsou minimální rozdíly a také údržba lokomotiv je prováděna častěji a nemívají imperfekce na pojezdové ploše kol, které zvyšují dynamické účinky. Všechny tyto aspekty jsou ideální pro srovnání dynamických účinků.

Pro dlouhodobé hodnocení efektivity údržbových prací, pro monitoring dynamických účinků ve výhybce v průběhu životního cyklu a pro lepší plánování údržbových prací doporučuji využít stacionární měřicí systém s využitím trvalého umístěného čidla zrychlení vibrací, které bude umístěno na křídlové kolejnici a bude snímat zrychlení kmitání konstrukce ve svislém směru. Pro vyhodnocení doporučuji využití matematického aparátu, který byl využit i v rámci této disertační práce.

13.5. Návrh zařízení na měření dynamických účinků

Pro mobilní zařízení na diagnostiku dynamických účinků na srdcovkách výhybek doporučuji jednoosé kostkové snímače zrychlení kmitání. Rozsah snímačů doporučuji na základě vyhodnocených dat z měření $2500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ v poloze na pražcích a $7000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ v umístění na křídlové kolejnici. Snímané frekvenční pásmo v rozsahu minimálně 1 Hz až 1 kHz. Doporučuji 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. Měřicí ústředna by měla mít minimálně následující parametry. Vzhledem k využívanému frekvenčnímu intervalu do 1000 Hz musí systém umožňovat frekvenci vzorkování pro každý kanál více než 2,5 násobek nejvyšší požadované frekvence, tedy 2500 Hz nebo vyšší. Měřicí systém musí poskytovat 16 bitové, případně 24 bitové rozlišení při snímání měřených veličin s napěťovými nebo ICP vstupy a simultánní vzorkování. Dynamický rozsah vstupů minimálně 80 dB. Systém musí být vybaven anti-aliasingovým filtrem pro každý kanál.

Pro mobilní zařízení doporučuji využití podobných parametrů, ale je možné využití i levnějších komponent, aby se cena zařízení povedla stlačit co nejnižší. Zařízení by také mělo umožňovat zaslání změřených dat na určený server (ve struktuře popsané níže), případně možnost ukládání dat, aby byl možný fyzický sběr naměřených dat. Data doporučuji ukládat ve formátu txt (dle struktury uvedené níže), aby bylo možné jejich načtení do vyhodnocovacích softwarů.

13.6. Data pro optimalizaci výpočetních modelů

Z provedených měření se povedlo získat velké množství dat, které je možné využít rovněž pro optimalizaci výpočetních modelů. Známý jsou nejen maximální hodnoty zrychlení kmitání a jejich časový průběh, ale také hodnoty zrychlení kmitání na jednotlivých frekvencích a složení frekvenčních spekter. Data z měření je vhodné pro další využití, uložit v jednotné přehledné datové struktuře, kterou doporučuji dodržovat i u dalších měření. V hlavičce dokumentu jsou údaje o měření, jako je datum, počet změřených kanálů, vzorkovací frekvence, typ vlaku apod. Pod hlavičkou je pak v jednom řádku označení jednotlivých čidel a v dalším řádku odpovídající jednotky. V následujících řádcích jsou již číselné hodnoty. V prvním sloupci je časová osa a dalších již odpovídající hodnoty změřené veličiny na jednotlivých snímačích. Vzorová struktura dat je na *Obr. 13.1* níže.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1	Data info																	
2	File name: D:\Data\Data_6_4_2012\4_Os_2012_04_06_122339_Ch.dsd																	
3	Start time: 6.4.2012 19:23																	
4	Number of channels: 17																	
5	Sample rate: 10000																	
6	Store type: vždy rychle																	
7	Global header information:																	
8	Komentář:																	
9																		
10	Events																	
11	Event Type	Event			Time		Comment											
12	1	Ukládání spuštěno			0													
13	2	Ukládání ukončeno			14.5854													
14																		
15																		
16	Data1																	
17	t	S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	A0Z	A1Z	A2Z	A3Z	A4X	A5Y	A6Z	A7Z	A8Z
18	s	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	m/s²	m/s²	m/s²	m/s²	m/s²	m/s²	m/s²	m/s²	m/s²
19	0	-0.01359509	0.02052082	0.0048348	0.01188263	0.00713896	0.00266131	0.00042264	0.01137915	0.1157847	0.52928078	0.48712251	0.18987501	-0.15002508	0.65156776	2.0363588	-1.5744308	2.6906497
20	0.0001	-0.013431445	0.02051359	0.00495587	0.0118258	0.00705001	0.00281812	0.00052945	0.01154308	-0.028647	0.36186111	0.32896316	0.17887834	1.6256675	0.07046282	1.1421592	-1.9231256	2.5902925
21	0.0002	-0.013324629	0.02024294	0.0049878	0.01165493	0.00681471	0.00268621	0.00049752	0.01166425	-0.15051126	0.16425024	0.44272545	0.09364501	2.4900706	-0.60616934	0.68795955	-2.1672807	2.1439517
22	0.0003	-0.013103774	0.02013993	0.00493097	0.01154089	0.00656877	0.0027611	0.00051881	0.01176403	-0.25686055	-0.05806086	0.53428918	-0.01907998	1.7252928	-0.12589347	1.394806	-2.1115725	1.4568938
23	0.0004	-0.012961416	0.02018592	0.00491311	0.0114413	0.00659005	0.00265048	0.00058305	0.01178902	-0.33358994	-0.03336064	0.18745388	0.05240751	0.95465231	-0.70434523	1.9483607	-1.7972652	0.89265066
24	0.0005	-0.012804803	0.02012548	0.00482416	0.01137706	0.00646537	0.00272537	0.0006222	0.01176403	-0.3795712	0.2850104	0.00154753	0.16512793	0.95758367	-1.1766616	1.0484803	-1.3247741	0.45051971
25	0.0006	-0.012719464	0.02004376	0.00479926	0.011313	0.00627303	0.0027075	0.00057963	0.01173552	-0.40467736	-0.10746586	-0.12608594	0.27235457	1.4205542	-0.53983134	-0.9755376	-0.68722004	0.03014462

Obr. 13.1 Vzorová datová struktura pro uchování dat z měření

14. Doporučení

Na základě získaných zkušeností doporučuji doplnění současného systému sledování geometrických parametrů ve výhybce, měření ojetí a měření měřicím vozem o systém sledování dynamických účinků, jak je navržen v rámci této disertační práce. Měření dynamických účinků doporučuji především na konstrukcích v hlavních kolejích, kde vlaky projíždějí plnou traťovou rychlostí a způsobují největší dynamické účinky. Pro zkoušení nových konstrukcí doporučuji použití plné metodiky měření včetně měřicích kamenů, které se při měřeních osvědčily. Pro hodnocení efektivitu údržbových prací doporučuji použití redukované metodiky měření, jak je popsána v předchozí kapitole (čtyři čidla zrychlení kmitání). Pro dlouhodobé sledování dynamických účinků v srdcovkové části výhybek doporučuji použití stacionárního (trvalého) zařízení s alespoň jedním snímačem zrychlení vibrací umístěným na křídlové kolejnici. Přednostně doporučuji použít toto zařízení na výhybkách, které jsou problematické z pohledu údržby. Doporučuji využití stacionárního zařízení alespoň na několika výhybkách v hlavních kolejích. Často se údržba provádí, jen aby se nějaký opravný zásah provedl, bez ohledu na to, že je neefektivní. Díky hodnocení dynamických účinků by bylo možné údržbové práce lépe hodnotit i plánovat, což by ve výsledku vedlo k snížení celkových nákladů na údržbu. V blízké budoucnosti lze očekávat, že se budou i nadále do železniční dopravy prosazovat inteligentní zařízení, které budou spolupracovat se systémem údržby a budou tvořit ucelený systém hospodaření s železniční dopravní cestou. Mnou navržená metodika měření a analýzy změřených dat by mohla tvořit jeden ze submodulů tohoto systému.

Protože se při správě zkušebních úseků neustále objevují nekoncepční zásahy ve formě, byť často v dobré víře provedených opravných prací (podbíjení, broušení), doporučuji, aby byl na zkušební úseky určený zaškolený koordinátor. Bez jeho souhlasu by nesměly být provedeny žádné opravné práce na zkušebních úsecích. Tento koordinátor by byl v kontaktu s pracovníky provádějícími měření na zkušebních úsecích a údržba by byla před provedením konzultována. Tento postup je třeba zavést do předpisu a proškolit všechny pracovníky SŽDC, společností provádějících údržbu i stavebních společností. Musí být určeny i sankce za nedodržení předpisu. Zkušební úseky prostě musí mít zvláštní režim, jinak jejich existence zcela ztrácí svůj smysl a účinnost jednotlivých konstrukčních opatření nebude možné řádně posoudit.

Na základě prvního srovnávacího měření doporučuji další měření na výhybkách v Ústí nad Orlicí, protože podbití výhybky č. 4 zřejmě ovlivnilo výsledky měření. U výhybek v Chocni doporučuji kontrolu stavu železničního spodku, alespoň georadarem a případně při další možnosti výluky naplánovat sanaci železničního spodku a případně i odvodnění. Uzel upevnění, který je použit u výhybky č. 10 v žst. Poříčany (s vulkanizovanými podložkami), velmi dobře tlumí vibrace na přechodu do pražce

a celkově tak snižuje dynamické účinky na pražec i na kolejové lože. To ve výsledku vede k větší živostnosti konstrukce výhybky jako celku, což potvrzují i praktické zkušenosti s výhybkou č. 10 v žst. Poříčany.

Doporučuji také, aby výhybky byly na měření dynamických účinků připravovány už ve výrobě. Malý návarek na křídlové kolejnici, ve kterém budou navrtány závity na zašroubování čidel, by mohl výrazně zrychlit instalaci snímačů a také zajistit, že budou všechna měření prováděna na stejných místech, čímž se zajistí i opakovatelnost měření. Stejně tak na pražci by malá krychlička, se závitem pro instalaci čidla zabudovaná už ve výrobě do pražce (tak aby nijak z pražce nevyčnívala), velmi pomohla při instalaci čidel.

Dále doporučuji bezpečnostní opatření ve formě zřízení přípravy pro měřicí stanoviště. U výhybek u nichž bude probíhat zkušební provoz, je vhodné už během stavby zřídit zpevněnou plochu na drážní stezce o šířce minimálně dva metry a délce minimálně tři metry. Tato plocha by měla být jak u srdcovky výhybky, tak u výměny. Tím by se výrazně usnadnil pohyb pracovníků provádějících měření v koleji a zvýšila se jejich bezpečnost. Ke zpevněným plochám doporučuji přivést i přístupové komunikace, aby bylo možné aparaturu bezpečně přemístit na místo měření.

Po zkušenostech z experimentálních měření doporučuji dále pracovat na vývoji zařízení pro diagnostiku dynamických účinků ve výhybce. Je to lepší cesta, než nákup “černých skříněk“, u kterých nevíme, s jakým pracují matematickým aparátem a jaký mají hodnotící systém. V rámci vývoje zařízení doporučuji i vývoj systému hodnocení pomocí nových matematických metod na principu umělé inteligence. Je třeba podpořit výzkum na univerzitách a ještě více ho propojit s praktikou aplikací v provozu. Zde je stále prostor pro zlepšení spolupráce mezi SŽDC, podniky železničního průmyslu a univerzitami, která bude oboustranně prospěšná.

Seznam použité literatury a dalších informačních zdrojů

- [1] KOMISE EVROPSKÝCH SPOLEČENSTVÍ. *Bílá Kniha: Evropská dopravní politika pro rok 2010 čas rozhodnutí*, KOM (2001) 370, 2001
- [2] KOMISE EVROPSKÝCH SPOLEČENSTVÍ. *Zelená Kniha: TEN-T: přezkum politiky, Směrem k lépe integrované transevropské dopravní síti ve službách společné dopravní politiky*, KOM (2009) 44, 2009
- [3] *Rozhodnutí Rady Evropské unie ze dne 25. dubna 2002 o schválení Kjótského protokolu k Rámcové úmluvě OSN o změně klimatu jménem Evropského společenství a o společném plnění závazků z něj vyplývajících*. Č.: 2002/358/ES
- [4] *Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2008/57/ES, ve znění směrnice Komise 2009/131/ES a směrnice Komise 2011/18/EU a směrnice Komise 2013/9/EU a směrnice Komise 2014/38/EU, o interoperabilitě železničního systému ve Společenství*
- [5] *Příloha nařízení Komise (EU) č. 1302/2014, ze dne 18. listopadu 2014 o technické specifikaci pro interoperabilitu subsystému kolejová vozidla – lokomotivy a kolejová vozidla pro přepravu osob železničního systému v Evropské unii*
- [6] *Příloha nařízení Komise (EU) č. 1304/2014, ze dne 26. listopadu 2014 o technické specifikaci pro interoperabilitu subsystému „kolejová vozidla – hluk“, kterou se mění rozhodnutí 2008/232/ES a zrušuje rozhodnutí 2011/229/EU*
- [7] *Příloha nařízení Komise (EU) č. 321/2013, ze dne 13. března 2013 o technické specifikaci pro interoperabilitu subsystému „kolejová vozidla – nákladní vozy“ železničního systému v Evropské unii a o zrušení rozhodnutí Komise 2006/861/ES; ve znění nařízení Komise č. 1236/2013, ze dne 2. prosince 2013 o technické specifikaci pro interoperabilitu subsystému „kolejová vozidla – nákladní vozy“ železničního systému v Evropské unii a změně nařízení Komise (EU) č. 321/2013 a ve znění nařízení Komise (EU) 2015/924, ze dne 8. června 2015, kterým se mění nařízení (EU) č. 321/2013 o technické specifikaci pro interoperabilitu subsystému „kolejová vozidla – nákladní vozy“ železničního systému v Evropské unii*
- [8] *Příloha nařízení Komise (EU) č. 1299/2014, ze dne 18. listopadu 2014, o technických specifikacích pro interoperabilitu subsystému infrastruktura železničního systému v Evropské unii*
- [9] *Příloha nařízení Komise (EU) č. 1301/2014, ze dne 18. listopadu 2014, o technických specifikacích pro interoperabilitu subsystému energie železničního systému v Unii*

- [10] *Příloha rozhodnutí Komise ze dne 25. ledna 2012 č. 2012/88/EU o technické specifikaci pro interoperabilitu týkající se subsystémů pro řízení a zabezpečení transevropského železničního systému; ve znění rozhodnutí Komise ze dne 6. listopadu 2012 č. 2012/696/EU, kterým se mění rozhodnutí 2012/88/EU o technické specifikaci pro interoperabilitu týkající se subsystémů pro řízení a zabezpečení transevropského železničního systému a ve znění rozhodnutí Komise (EU) 2015/14 ze dne 5. ledna 2015, kterým se mění rozhodnutí 2012/88/EU o technické specifikaci pro interoperabilitu týkající se subsystémů pro řízení a zabezpečení transevropského železničního systému*
- [11] *Příloha nařízení Komise (EU) č. 1300/2014, ze dne 18. listopadu 2014, o technických specifikacích pro interoperabilitu týkající se přístupnosti železničního systému Unie pro osoby se zdravotním postižením a osoby s omezenou schopností pohybu a orientace*
- [12] *Příloha nařízení Komise (EU) č. 1303/2014, ze dne 18. listopadu 2014, o technických specifikacích pro interoperabilitu týkající se „bezpečnosti v železničních tunelech“ železničního systému Evropské unie*
- [13] *Příloha nařízení Komise (EU) č. 2015/995, ze dne 8. června 2015, kterým se mění rozhodnutí 2012/757/EU o technické specifikaci pro interoperabilitu týkající se subsystému „provoz a řízení dopravy“ železničního systému v Evropské unii*
- [14] *Příloha nařízení Komise (EU) č. 1305/2014, ze dne 11. prosince 2014 o technické specifikaci pro interoperabilitu subsystému „Využití telematiky v nákladní dopravě“ železničního systému Evropské unie a o zrušení nařízení (ES) č. 62/2006*
- [15] *Příloha nařízení Komise (EU) č. 454/2011, ze dne 5. května 2011, o technické specifikaci pro interoperabilitu týkající se subsystému „využití telematiky v osobní dopravě“ transevropského železničního systému; ve znění nařízení Komise č. 665/2012 ze dne 20. července 2012, kterým se mění nařízení (EU) č. 454/2011 o technické specifikaci pro interoperabilitu týkající se subsystému „využití telematiky v osobní dopravě“ transevropského železničního systému a ve znění nařízení Komise (EU) č. 1273/2013 ze dne 6. prosince 2013, kterým se mění nařízení (EU) č. 454/2011 o technické specifikaci pro interoperabilitu týkající se subsystému „využití telematiky v osobní dopravě“ transevropského železničního systému*
- [16] SMUTNÝ, J., I. VUKUŠIČ, L. PAZDERA a V. TOMANDL. Metodika měření dynamických účinků v srdcovkové části výhybek. *Nová železniční technika*. KPM Consult a.s., Brno, 2012. ISSN: 1210-3942
- [17] WITT, S. *The Influence of Under Sleeper Pads on Railway Track Dynamics*. Linköping: Linköping University, Department of Management and

- Engineering Division of Solid Mechanics, 2008. LIU-IEI-TEK-A- -08/00442- -SE.
- [18] ZWANENBURG, Willem-Jan. *Modelling degradation processes of switches & crossings for maintenance & renewal planning on the Swiss railway network*. 6th Swiss Transport Research Conference. Ascona, March 2006.
- [19] HASSANKIADEH Seyedahmad Jalili. *Failure Analysis of Railway Switches and Crossings for the purpose of Preventive Maintenance*. Master Degree Project. Stockholm: Division of Highway and Railway Engineering, Department of Transport Science, School of Architecture and the Built Environment, Royal Institute of Technology. ISSN 1650-867X, 2011.
- [20] ZWANENBURG, Willem-Jan. *Modelling degradation processes of switches & crossings for maintenance & renewal planning on the Swiss railway network*. Lausanne: École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2009. Thèse No. 4176.
- [21] *Rail Switches and Crossings. Development of new technologies for replacement*. Projekt Mainline, 7th Framework Programme, Final report. 2014. Grant Agreement number 285121.
- [22] PLÁŠEK, O. *Teoretická a experimentální analýza chování betonových prachů v kolejovém loži*. Brno, 2006. Vědecké spisy Vysokého Učení Technického v Brně, Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 218. ISBN 80-214-3309-4.
- [23] ZELENKA, J. *Geometrical interaction of railway wheelset by passing through turnouts of Czech Railways corridor tracks*. Česká Třebová: Proceedings of 5th Specialized Conference on Welding in Railway Transport, 2003. pp. 79-86.
- [24] NICKLISCH, D. *SIMPACK-simulations of passing switches and crossings*. December 2008. INNOTRACK Technical report.
- [25] NICKLISCH, D. *SIMPACK-simulations of contact stresses on switches and crossings*. July 2009. INNOTRACK Technical report.
- [26] JOHANSSON, A., B. PÅLSSON, M. EKH, J. C. O. NIELSEN, M. K. A. ANDER, J. BROUZOULIS a E. KASSA: *Simulation of wheel-rail contact and damage in switches and crossings*. Firenze: 8th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems, September 2009. ISSN 0043-1648, 2011.
- [27] *Recommendation of, and scientific basis for, optimisation of switches & crossings – part 1*. Projekt Innotrack. Deliverable report D3. 2011. Project No. TIP5-CT-2006-031415.
- [28] MARKINE, V., M. STEENBERGEN a I. SHEVTSOV. *A dynamic model for analysis of damage of railway switches*. Stockholm: 21st International Symposium on Dynamics of Vehicles on Road and Tracks, August 2009.

- [29] VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, ÚSTAV ŽELEZNIČNÍCH KONSTRUKCÍ A STAVEB. *Měření svislých pohybů a parametrů vibrací výhybkových prážců – 2005*. Brno, září 2005. Závěrečná zpráva. [24s, 10s příl.].
- [30] VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, ÚSTAV ŽELEZNIČNÍCH KONSTRUKCÍ A STAVEB. *Měření svislých posunů prážců a vibrací v oblasti srdcovky výhybky č. 21 v žst. Moravany*. Brno, říjen 2007. Závěrečná zpráva. [16s, 7s příl.].
- [31] *Vyhláška Ministerstva dopravy č. 177/1995 Sb., kterou se vydává stavební a technický řád drah, ve znění vyhlášky č. 243/1996 Sb., vyhlášky č. 346/2000 Sb., vyhlášky č. 413/2001 Sb., vyhlášky č. 577/2004 Sb., vyhlášky č. 58/2013 Sb. a vyhlášky č. 8/2015 Sb.*
- [32] ČSN 73 6360-2 *Konstrukční a geometrické uspořádání koleje železničních drah a její prostorová poloha – Část 2: Stavba a přejímka, provoz a údržba*. Včetně změny Z1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, říjen 2009.
- [33] *Směrnice SŽDC č. 51 pro provádění prohlídek a měření výhybek*. 2008.
- [34] VYMLÁTIL, Petr. *Výpočtový model konstrukce železniční trati pro explicitní dynamickou analýzu*. Ostrava: Konference Modelování v mechanice, 2006. ISBN 80-248-1035-2.
- [35] XIN, L., V. L. MARKINE a I. Y. SHEVTSOV. *Dynamic Interaction Between the Wheel and Crossing Nose*. The Fourteenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing, 2013. Paper 22.
- [36] PLETZ, M., W. DAVES, H. OSSBERGER. *A wheel set/crossing model regarding impact, sliding and deformation-Explicit finite element approach*, Wear. ISSN 00431648, 2012.
- [37] KASSA Elias a Clas ANDERSSON. *Simulation of dynamic interaction between train and railway turnout*. Vehicle System Dynamics, 2006. S. 44, 247-258. ISSN 042-3114.
- [38] KASSA. *Dynamic train–turnout interaction – mathematical modelling, numerical simulations and field testing*. Gothenburg: Department of Applied Mechanics, Chalmers University of Technology, 2007. PhD thesis. ISBN 978-91-7385-003-2.
- [39] DAHLBERG, Tore. *Railway track settlements*. Linköping: Division of Solid Mechanics, IKP, Linköping University, 2003. A literature review, report for the EU project SUPERTRACK.
- [40] FERELLEC, J.-F. a G. R. MCDOWELL: *Modelling of ballast-geogrid interaction using the discrete element method*. Geosynthetics International, roč. 19, 2012. No. 6, s. 470-479. ISSN 1072-6349.

- [41] HARKNESS, J., S. AHMED, L. LE PEN, A. ZERVOS a W. POWRIE. *Numerical modeling of triaxial tests on railway ballast*. Paris: Railway Track Science & Engineering International Workshop Ballast Issues & Challenges, UIC, december 2013.
- [42] SAUSSINE, G. a Ch. VOIVRET: *DEM modeling serving science and engineering at SNCF*. Paris: Railway Track Science & Engineering International Workshop Ballast Issues & Challenges, UIC, December 2013.
- [43] ELIÁŠ, J. *DEM simulation of railway ballast using polyhedral elemental shapes*. Stuttgart: III. International Conference on Particle-Based Methods. Fundamentals and Applications, 2013. ISBN 978-84-941531-8-1.
- [44] ELIÁŠ, J. a O. PLÁŠEK: *DEM simulation of railway ballast oedometric test*. Paris: Railway Track Science & Engineering International Workshop Ballast Issues & Challenges, UIC, December 2013.
- [45] YAN, W., T. ANTREITER, F. FISCHER a H. BLUMAUER. *Numerical Analysis of the Cyclic Response of a Crossing Component in Switch*. Loeben: XIX. Verformungskundliches Kolloquium Montanuniversität , 2000. pp. 78 – 83.
- [46] FISCHER, OBERAIGNER, DAVES, WIEST, BLUMAUER, OSSBERGER. The Impact of a Wheel on a crossing. Die Stosswirkung eines Rades auf das Herzstück einer Weiche. *ZEV Rail Glasers Annalen* 129. August 2005. ISSN 1618-8330.
- [47] JENKINS, H., J. STEPHENSON, G. CLAYTON, G. MORLAND a D. LYON. The Effect of Track and Vehicle Parameters on Wheel/Rail Vertical Dynamic Forces. *Railway Engineering International*. January 1974. S. 2 – 16.
- [48] PLÁŠEK, O. *Dynamické jevy v konstrukci koleje*. 30.10.2006. Habilitační přednáška. [30 s].
- [49] ANDERSSON, C. a T. DAHLBERG. *Wheel/Rail Impacts at a Railway Turnout Crossing*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers 212 Part F (1998), s. 123 – 134.
- [50] WIEST, DAVES, FISCHER, OSSBERGER. Analýza přejíždění srdcovky metodou konečných prvků. *ZEVrail Glasers Annalen* 11-12/2005. ISSN 1618-8330.
- [51] VUKUŠIČ, I. *Srovnání dynamických účinků na výhybkách*. 12. Odborná konference doktorského studia JUNIORSTAV 2010. ISBN 978-80-214-4042-5.
- [52] SMUTNÝ, J., I. VUKUŠIČ, V. TOMANDL, L. PAZDERA a D. SADLEKOVÁ. Analýza dynamických účinků v srdcovkové části výhybek. *Stavební obzor*. Praha: FAST ČVUT, 2013. ISSN 1210-4027.

- [53] SMUTNÝ, J., I. VUKUŠIČ a V. TOMANDL. Analýza dynamických parametrů výhybek. *Stavební obzor*. Praha: FAST ČVUT, 2010. ISSN 1210-4027.
- [54] 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.
- [55] NICKLISCH, D., E. KASSA, J. NIELSEN, M. EKH a S. IWNICKI. *Geometry and stiffness optimization for switches and crossings, and simulation of material degradation*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, July 2010. vol. 224, no. 4 279-292.
- [56] SCHMIDOVÁ, E. *Strukturní a fázové analýzy svarového spoje bainitické kolejnicové oceli*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2004. Třetí vědecká konference. s. 27-44. ISBN 80-7194-565-X.
- [57] SCHMIDOVÁ, E., I. HLAVATÝ, D. JANOVÁ. Specifika degradačních mechanismů bainitické oceli v podmínkách kontaktu kolo – kolejnice. *Scientific Papers Of The University Of Pardubice*. Series B. The Jan Perner Transport Faculty, October 2004.
- [58] FENCL J. *Výhybky a výhybkové konstrukce z pohledu správce*. Brno: FAST VUT v Brně, 26. 2. 2015. Prezentace na workshopu v rámci projektu IRICoN s názvem „Výhybky a výhybkové konstrukce, kolejnicové vady v souvislosti s interoperabilitou evropské železniční infrastruktury“.
- [59] HLAVATÝ, I., E. SCHMIDOVÁ, M. SIGMUND. *Problematika svařitelnosti bainitických ocelí*. 9. ročník odborného semináře „Nové materiály, technologie a zařízení pro svařování“, 2006. ISBN 80-248-1154-5.
- [60] *Recommendation of, and scientific basis for, optimisation of switches & crossings – part 2*. Projekt Innotrack. Deliverable report D3. 1.6, 2011. Project No. TIP5-CT-2006-031415.
- [61] PLÁŠEK, O. *Železniční stavby I. Modul 3, Výhybky a výhybkové konstrukce*. Brno: VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, Fakulta stavební, 2007. Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia. [74 s].
- [62] DT – VÝHYBKÁRNA A STROJÍRNA, a.s. *Katalog – železniční výhybky*. Přístupný z: www.dtv.cz. [20 s].
- [63] ZELENKA, J. a M. KOHOUT. *Možnosti ovlivnění jízdních a vodících vlastností kolejových vozidel parametry dopravní cesty*. Pardubice: 16. konference „Železniční dopravní cesta 2010“, 23. - 25. 3. 2010. Sborník přednášek. S. 60 – 67. ISBN 978-80-254-6802-2.

- [64] Předpis SŽDC S3. *Železniční svršek*. díl VII – Sestavy železničního svršku a jejich použití, ve znění změny č. 1 a změny č. 2. Počet listů 29. 2008.
- [65] SMOLKA, M., H. KREJČÍŘÍKOVÁ a J. SMUTNÝ. *Zvýšení kvality jízdní dráhy ve výhybkách pomocí zpružení*. Praha: 17. konference „Železniční dopravní cesta 2012“, 27. - 29. 3. 2012. Sborník přednášek. S. 145 – 150.
- [66] VOSSLOH FASTENING SYSTEMS GmbH. *Brochure System W 21 T*. Dostupné z: <http://www.vossloh-fastening-systems.com>. [2 s].
- [67] VOSSLOH FASTENING SYSTEMS GmbH. *Brochure System W 30 T*. Dostupné z: <http://www.vossloh-fastening-systems.com> [2 s].
- [68] VOSSLOH FASTENING SYSTEMS GmbH. *Brochure System 300 W*. Dostupné z: <http://www.vossloh-fastening-systems.com> [2 s].
- [69] VOESTALPINE BWG GmbH & Co KG. *Brochure ERL Elastic Ribbed Plate Support*. Dostupné z: <http://www.voestalpine.com/> [4 s].
- [70] LICHTBERGER, B. *Handbuch Gleis. Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit*. Tetzlaff Verlag Hamburg, 2003. [562 s]. ISBN 3-87814-803-8.
- [71] LOY, H. Under Sleeper Pads: improving track quality while reducing operational costs. In *European Railway Review*. 2008. S. 7.
- [72] USP – Under Sleeper Pads – Semelles sous traverses – Schwellenbesohlungen. In *Summarising report of UIC Project No. I/05/U/440*, 4th Edition. Vienna, 2009. S. 40.
- [73] HRUZÍKOVÁ, M. *Vliv podpražcových podložek na kvalitu jízdní dráhy*. Dizertační práce. Brno, 2012. 171 s., 13 p. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav železničních konstrukcí a staveb. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Otto Plášek, Ph.D.
- [74] PLÁŠEK, O., M. HRUZÍKOVÁ, R. SVOBODA a J. BÍLEK. Under Sleeper Pads in Railway Track. Článek v *Communications*. 2014. ISSN 1335-4205.
- [75] GETZNER WERKSTOFFE GmbH. *Brožura Podpražcové podložky pro štěrkové traťové lože*. [16 s]. Dostupné z: <http://www.getzner.com>
- [76] SMUTNÝ, Jaroslav a Luboš PAZDERA. *The experimental analysis of dynamic processes related to railway transport*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2012. 1st ed. 1 CD-ROM. ISBN 978-80-7204-827-4.
- [77] MORAVČÍK, M. a M. MORAVČÍK. *Mechanika železničních tratí, 3. díl, Experimentálna analýza namáhania a pretvorenia komponentov trate*. Žilina: EDIS – vydavateľstvo ŽU, 2002. [220 s]. ISBN 80-7100-985-7.
- [78] LIEBERENZ, K. a U. WEISEMANN. *Geokunststoffe in dynamisch belasteten Erdbauwerken an Eisenbahnstrecken*. Rail International – Schienen der Welt, Dezember 2002. S. 30–39.

- [79] VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, ÚSTAV ŽELEZNIČNÍCH KONSTRUKCÍ A STAVEB. *Měření dynamického namáhání konstrukce železničního svršku ve výhybce č. 5 žst. Vranovice – závěrečná zpráva*. Brno, listopad 2003. [39 s, 78 s příl.].
- [80] SMUTNÝ, J., I. VUKUŠIČ a V. TOMANDL. Zkušenosti z experimentálního měření dlouhých výhybkových prachů. In: *Vědeckotechnický sborník Českých drah*. Praha: Generální ředitelství Českých drah, Nábřeží L. Svobody 1222, Praha, 2010. ISSN 1214-9047.
- [81] LEYKAUF, G., L. MATTNER a L. STEINBEISSER. Erprobung und Anwendung des Messverfahrens zur Ermittlung der Schotterschwingungen. Messungen bei Burgsinn und Waghaeusel. Im Rahmen der Schriftenreihe *Mitteilungen des Prüfamtes für Verkehrswegebau der Technischen Universität München*. Heft 71. 1997. ISSN 0341-5538.
- [82] AIKAWA Akira. *Techniques to Measure Effects of Passing Trains on Dynamic Pressure Applied to Sleeper Bottoms and Dynamic Behavior of Ballast Stones*. 2009. Quarterly Report of RTRI. Vol. 50, No. 2 P 102-109. ISSN: 1880-1765.
- [83] AIKAWA Akira. *Research on Vertical Natural Vibration Characteristics of Gravel Aggregate in Ballasted Track*. 2015. Quarterly Report of RTRI. Vol. 56, No. 1 p. 26-32. ISSN: 1880-1765.
- [84] BRÜEL & KJÆR SOUND & VIBRATION MEASUREMENT A/S. *Product Data, Photoelectric Tachometer Probe — MM0024*. Dostupné z: <http://www.bksv.com>
- [85] VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, ÚSTAV ŽELEZNIČNÍCH KONSTRUKCÍ A STAVEB. *Měření napětí v konstrukci pražcového podloží ve výhybce č. 5 v žst. Vranovice – III. Měření – zpráva*. Brno, 30. 11. 2004. [15 s, 9 s příl.].
- [86] Materiály k projektu *Zvýšení kvality jízdní dráhy ve výhybkách pomocí zpružnění*. Podporovaný Technologickou agenturou České republiky. Kód projektu TA01031297.
- [87] Geokon, Incorporated. Obrázek z webu <http://www.geokon.com>
- [88] JANDOVÁ, Kateřina. *Prezentace – Vibrodiagnostika*. Laboratoř diagnostiky materiálů, detašované pracoviště Ústavu termomechaniky AV ČR, v.v.i., 2006. Dostupné z: <http://www.cdm.cas.cz/czech/>
- [89] NOVÝ, R. *Hluk a chvění*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. [389 s]. ISBN 80-01-02246-3.
- [90] SMUTNÝ Jaroslav a Luboš PAZDERA. *Železniční stavby – Měřicí technika a dynamika železničních staveb*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 1998. ISBN 80-214-0976-2.

- [91] SMUTNÝ, J. *Moderní metody analýzy hluku a vibrací aplikované na kolejovou dopravu*. Brno: VUT Brno. Teze k doktorandské disertační práci. ISBN 80-214-0988-6.
- [92] TOMANDL, V. *Analýza dynamických parametrů kolejnicových upevnění*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2007. Diplomová práce. Vedoucí práce doc. Ing. Jaroslav Smutný, Ph.D.
- [93] Plánky železničních stanic z: http://iwan.eu07.pl/jw/john_woods2009/planky/
- [94] PROJEKT SUDOP PRAHA a.s. *Průjezd železničním uzlem Ústí nad Orlicí. Situace (km 255,3 – km 256,2)*. Říjen 2010.

Seznam symbolů a zkratek

α	celkový úhel nájezdu kola do hrotu srdcovky
α_1	úhel poklesu kola při nájezdu na srdcovku
α_2	úhel stoupání kola po nárazu do klínu srdcovky
*	komplexní konjunkce
a	zrychlení
a_{ef}	efektivní hodnota zrychlení vibrací (častěji užívána jako RMS)
$a(t)$	okamžitá hodnota zrychlení vibrací
A	amplituda výchylky
A/D	analogicko/digitální převodník
$A0Z$	označení snímače zrychlení kmitání umístěného na měřicí tyči ve štěrkovém 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
$A10Z$	označení snímače zrychlení kmitání umístěného na 1. pražci před hrotem srdcovky

A11Z	označení snímače zrychlení kmitání umístěného na 1. pražci za místem přechodu z křídlové kolejnice na hrot srdcovky
c_T	ekvivalentní tlumení koleje
ČVUT	České vysoké učení technické v Praze
DEM	discrete element method (metoda diskrétních prvků)
DFT	diskrétní Fourierova transformace
ε	poměrná deformace
E	Youngův modul pružnosti
f_{vz}	vzorkovací frekvence
f_{Nyq}	Nyquistova frekvence
$f(x)$	křivka klouzavého RMS
FAST	Fakulta stavební
FFT	Fast Fourier Transform (rychlá Fourierova transformace)
FT	Fourier Transform (Fourierova transformace)
g	okénková funkce při výpočtu STFT
GPK	geometrické parametry koleje
i	imaginární jednotka
ICP	integrated circuit piezoelectric (integrovaný obvod piezoelektrický)
k_H	Hertzova kontaktní tuhost
k_{T2}	ekvivalentní tuhost koleje pro výpočet síly P_2
KRAB	vozík pro měření geometrických parametrů koleje
M	počet vzorků jednoho segmentu signálu při výpočtu Welchovou metodou
m_{T1}	spolupůsobící hodnota hmotnosti koleje pro výpočet síly P_1
m_{T2}	spolupůsobící hodnota hmotnosti koleje pro výpočet síly P_2
m_U	neodpružená hmotnost
N	celkový počet vzorků signálu při výpočtu Welchovou metodou
π	Ludolfovo číslo (3,14)
P	plocha pod křivkou klouzavého RMS
P_0	statická síla na kontaktu kolo-kolejnice

P_1	silový vrchol – „tvrdý ráz“
P_2	silový vrchol – „měkký ráz“
PHS	pohyblivý hrot srdcovky
Q	kolová síla
RMS	Root Mean Square (efektivní hodnota zrychlení vibrací)
σ	mechanické napětí
$S_j[k]$	Dílčí periodogramy spektrální hustoty při výpočtu Welchovou metodou
S	výsledný odhad spektrální hustoty při výpočtu Welchovou metodou
S_0	označení snímače posunu umístěného na 2. pražci před hrotem srdcovky
S_1	označení snímače posunu umístěného na 1. pražci před hrotem srdcovky
S_2	označení snímače posunu umístěného na hlavě pražce v přímé větvi
S_3	označení snímače posunu umístěného na pražci pod místem přechodu z křídlové kolejnice na hrot srdcovky v ose přímé větve
S_4	označení snímače posunu umístěného na pražci pod místem přechodu z křídlové kolejnice na hrot srdcovky
S_5	označení snímače posunu umístěného na pražci pod místem přechodu z křídlové kolejnice na hrot srdcovky v ose odbočné větve
S_6	označení snímače posunu umístěného na hlavě pražce v odbočné větvi
S_7	označení snímače posunu umístěného na 1. pražci za místem přechodu z křídlové kolejnice na hrot srdcovky
SŽDC	Správa železniční dopravní cesty, státní organizace
STFT	Short Time Fourier Transform (krátkodobá Fourierova transformace)
$STFT_x^{(\omega)}(t', f)$	časově-frekvenční reprezentace signálu
T	čas (doba, pro kterou se určuje efektivní hodnota)
t	čas
t'	časové posunutí okénka u STFT
txt	formát textového souboru
TSI	Technická specifikace interoperability
U	norma vektoru okénkové funkce u Welchovi metody

USP	under sleeper pads (podpražcové podložky)
ÚŽKS	Ústav železničních konstrukcí a staveb
ω	úhlová rychlost (úhlová frekvence)
V	rychlost jízdy vlaků v $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$
VUT	Vysoké učení technické v Brně
v	rychlost jízdy vlaku v $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
w	okénková funkce u Welchovi metody
$X(f)$	reprezentace signálu ve frekvenční oblasti
$x(t)$	reprezentace signálu v časové oblasti
ZMB	zkrácený monoblok
žst.	železniční stanice

Seznam příloh

Přílohy k měření v Poříčanech

- Tabulka změřených vlaků na výhybce č. 10
- Tabulka změřených vlaků na výhybce č. 1
- Metodika měření
- Přehledné grafy zrychlení vibrací a FFT na vybraných vlacích
- Časové vyhodnocení – tabulky maxim, minim a plochy pod klouzavou RMS
- Frekvenční vyhodnocení – Welchova metoda na výřezích lokomotiv
- Časově-frekvenční vyhodnocení – STFT na soupravách LEO Express
- Fotodokumentace z měření

Přílohy k měření v Chocni

- Tabulka změřených vlaků na výhybce č. 63
- Tabulky změřených vlaků na výhybce č. 59
- Metodika měření
- Přehledné grafy zrychlení vibrací a FFT na vybraných vlacích
- Přehledné grafy pohybového chování
- Časové vyhodnocení pohybového chování – tabulky maximálních zatlačení pražců
- Průhybové křivky
- Časové vyhodnocení zrychlení vibrací – tabulky maxim a minim
- Frekvenční vyhodnocení – Welchova metoda na výřezích lokomotiv
- Časově-frekvenční vyhodnocení – STFT na soupravách LEO Express
- Fotodokumentace z měření

Přílohy k měření v Ústí nad Orlicí

- Tabulka změřených vlaků na výhybce č. 3
- Tabulka změřených vlaků na výhybce č. 4
- Metodika měření
- Přehledné grafy pohybového chování na vybraných vlacích
- Tabulka zatlačení pražců na vybraných vlacích
- Průhybové křivky
- Přehledné grafy zrychlení vibrací a FFT na vybraných vlacích
- Frekvenční vyhodnocení – Welchova metoda na výřezích lokomotiv

- Časově-frekvenční vyhodnocení – STFT na soupravách LEO Express
- Fotodokumentace z měření