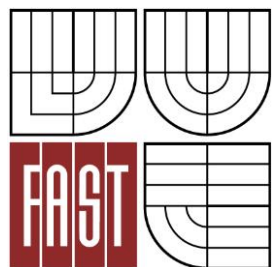




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



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

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ING. IVAN VUKUŠIČ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. JAROSLAV SMUTNÝ, Ph.D.

BRNO 2015

KLÍČOVÁ SLOVA

Výhybka, srdcovka, měření vibrací, dynamické účinky.

KEYWORDS

Turnouts, crossings, vibration measurement, dynamic effects.

OBSAH

OBSAH.....	1
1 ÚVOD.....	2
2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	2
3 CÍLE PRÁCE	4
3.1 Studium dynamických dějů ve výhybce	4
3.2 Metodika měření dynamických účinků.....	5
3.3 Matematický aparát	5
3.4 Hodnocení efektivity údržbových prací.....	5
3.5 Návrh zařízení na měření dynamických účinků	5
3.6 Data pro optimalizaci výpočetních modelů	6
4 TEORETICKÝ ROZBOR PROBLEMATIKY	6
5 METODIKA MĚŘENÍ.....	8
5.1 Metodika měření zrychlení vibrací.....	9
5.2 Pohybové chování konstrukce.....	9
6 MATEMATICKÝ APARÁT	11
6.1 Efektivní hodnota zrychlení kmitání	12
6.2 Frekvenční oblast.....	12
6.2.1 <i>Fourierova transformace</i>	13
6.2.2 <i>Welchova metoda</i>	13
6.3 Časově-frekvenční oblast.....	13
6.3.1 <i>Krátkodobá (okénková) Fourierova transformace (STFT)</i>	14
7 PROVEDENÁ MĚŘENÍ.....	14
8 VYHODNOCENÍ PROVEDENÝCH MĚŘENÍ	15
8.1 vyhodnocení pohybového chování konstrukce.....	15
8.2 vyhodnocení zrychlení vibrací.....	17
9 ZÁVĚR	20
9.1 Studium dynamických dějů ve výhybce	20
9.2 Metodika měření.....	22
9.3 Matematický aparát	23
9.4 Hodnocení efektivity údržbových prací.....	24
9.5 Návrh zařízení na měření dynamických účinků	24
9.6 Data pro optimalizaci výpočetních modelů	24
10 DOPORUČENÍ	25
LITERATURA	27
ABSTRACT	30

1 ÚVOD

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 realizovat zejména analýzu dynamických účinků a studium jejich šíření [2, 3]. 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) [4, 5, 6, 7]. Podle některých zdrojů tvoří údržba výhybek dokonce 20 – 40 % celkových nákladů na údržbu železniční sítě [4]. 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, atd.). 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.

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

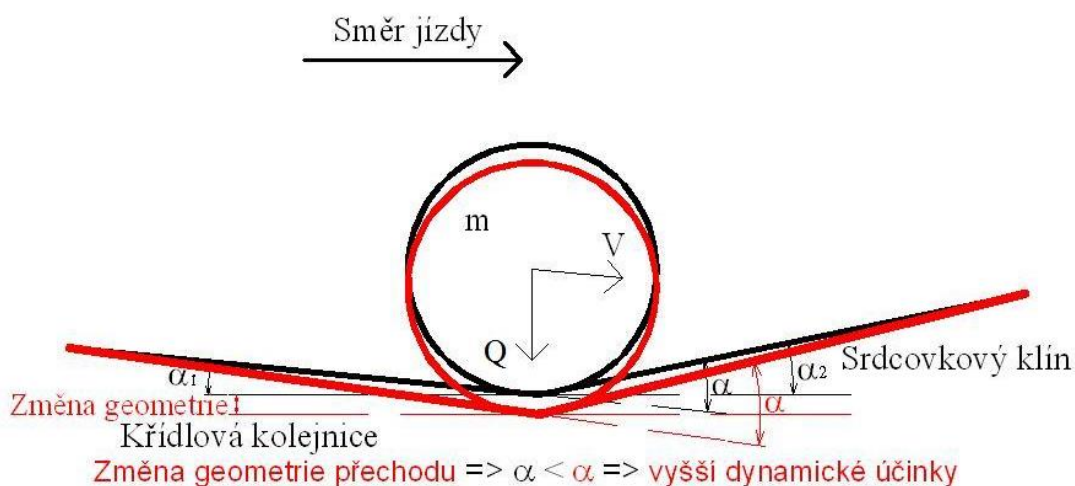
Neustálé zvyšování nároků na únosnost vede k větší tuhosti konstrukčních vrstev a zemní pláně. Používají se rovněž již téměř výhradně betonové pražce, které mají mnohem větší ohybovou tuhost a menší pružnost než pražce dřevěné. Všechny tyto aspekty vedou k většímu namáhání kolejového lože, které pod 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 [8]. 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 šterkového 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, zhroutí 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 [9], v zahraničí například [10, 11, 12]. 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 [13]. 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.

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. Podotkneme, 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 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, šterkové 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 jakéhokoliv 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

odchyly GPk, stejně jako opotřebení součástí výhybky, stanovené několika předpisy [17],[18] a [19]. Rovněž v rámci interoperability je tato problematika řešena v rámci konečného TSI pro subsystém Infrastruktura [1]. 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 je součástí disertační práce, přispěje k bezpečnosti provozu a optimalizaci údržbových prací.

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 odpoví na to, kdy které frekvence působí, především bude důležité se soustředit na okamžik přejezdu kola. Tuto oblast jsem analyzoval 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 měření 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 přechodové 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

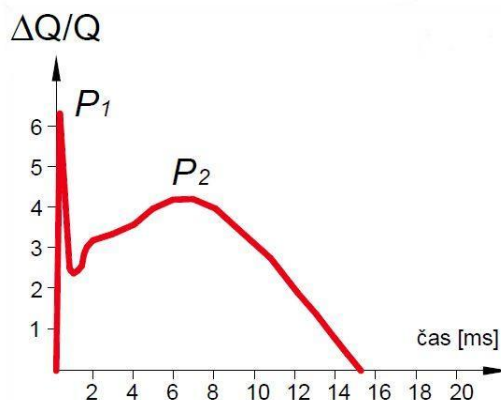
V neposlední řadě je cílem práce třídění a ukládání vhodných dat, která bude možné v budoucnu využít i pro optimalizaci výpočetních modelů (např. pro dynamickou analýzu výhybek).

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 [20, 21, 22, 23, 24]. 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 [25]. Existuje několik studií, které se zabývají modelováním dynamického rázu a zkoumají i vliv geometrie přechodu [10, 11, 12, 21, 14].

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 [26]. Při stanovení životnosti se zpravidla uvažuje právě toto napětí, viz [27]. Situace může být vyjádřena grafem na Obr. 4.1 [28].



Obr. 4.1 Rázové síly na srdcovce [28]

Síly P_1 a P_2 lze vypočítat dle následujících vzorců [4]:

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

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

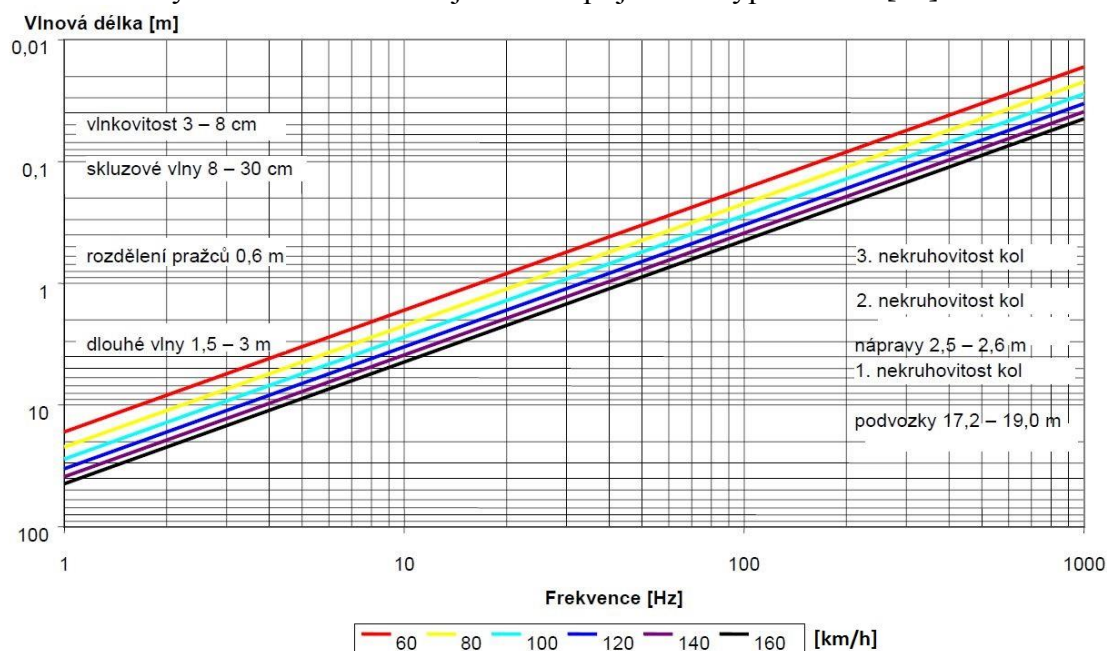
kde P_0 je statická síla na kontaktu kolo kolejnice (odpovídá kolové síle Q [kN]), α je celkový úhel pod kterým kolo narazí do srdcovky výhybky ($\alpha_1 + \alpha_2$) [rad], v je rychlost vlaku [$m \cdot s^{-1}$], k_H je Hertzova kontaktní tuhost [$N \cdot m^{-1}$], m_{T1} je spolupůsobící hodnota hmotnosti 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 [26]. 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 [6]. 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. [26, 14, 24, 10]) 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 [29, 30, 14, 24], tak i praktická měření přímo v trati [31, 32, 33, 34]. 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 – kolejjev 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 [8]. Z hlediska vlnových délek a frekvencí je obecně přijímána hypotéza dle [37] viz Obr. 4.2.



Obr. 4.2 Zdroje vibrací z hlediska vlnové délky [8]

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 [34]. 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 [34].

5 METODIKA MĚŘENÍ

V posledních letech je velká snaha o snížení dynamických účinků působících obecně na kolej pomocí zpružnění. To může být realizováno buď v uzlu upevnění, nebo pomocí tzv. podpražcových podložek. 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 [35]. Dále se budu věnovat prvním dvěma oblastem, měření šíření vibrací a měření pohybového chování konstrukce výhybky. Obě oblasti budou zaměřeny na oblast srdcovky, kde jsou největší dynamické účinky od projíždějících vlaků.

5.1 METODIKA MĚŘENÍ ZRYCHLENÍ VIBRACÍ

Dynamické účinky na konstrukce nejlépe vystihuje časový průběh zrychlení (případně rychlosti) [36]. 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.

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. 5.1). 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 (Obr. 5.1).

V rámci metodiky předpokládám měření zrychlení vibrací ve šterkovém loži pomocí vhodného přípravku – tyče, která slouží jako vlnovod. Nejlepším řešením je měření zrychlení vibrací ve šterkovém loži pomocí měřicích kamenů. V rámci projektu „Zvýšení kvality jízdní dráhy ve výhybkách pomocí zpružení“ byl měřící kámen vyvinut a vložen přímo pod srdcovku výhybky. Měřící kámen tvoří akcelerometry vestavěné do šterkového zrna. Pro tento účel jsou nejvhodnější akcelerometry typu MEMS, které jsou malé s dostatečnou citlivostí a napětovým výstupem.

5.2 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. Schéma rozmístění snímačů použitých pro měření a analýzu pohybové chování je zřejmé z obrázku *Obr. 5.1*.

Z obrázku *Obr. 5.1* 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 [16, 38]. 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. 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. 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 [8, 15, 16, 32, 39]. Z tohoto důvodu je snímač pohybů S4 umístěn v blízkosti srdcovky výhybky. Pokud se výhybkou jezdí převážně v přímém směru a odbočný směr není příliš vytížen, může dojít i k nežádoucímu převýšení výhybkového pražce, případně k jeho nadzvedávání při průjezdu vozidla [8, 39]. Díky tomuto rozmístění snímačů je možné všechny tyto významné jevy zachytit.

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). Pro podrobnou analýzu a rozbor dynamických účinků je to však informace nedostačující, neboť není známé 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.

6.1 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 [40].

$$a_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) \cdot dt}, \quad (6.1)$$

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

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 6.1 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 6.2:

$$P = \int_a^b f(x) dx, \quad (6.2)$$

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

6.2 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

6.2.1 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 [41]:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-i2\pi f t} \cdot dt \quad (6.3)$$

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.

6.2.2 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 [5].

$$S_j[k] = \frac{1}{U \cdot M} \cdot \left| \sum_{m=0}^{M-1} x[m + i \cdot M] \cdot w[m] \cdot e^{\left(\frac{-j 2\pi m k}{M}\right)} \right|^2, \quad (6.4)$$

kde

$$U = \frac{1}{M} \cdot \sum_{m=0}^{M-1} w^2[m] \quad (6.5)$$

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

$$\hat{S} = \frac{1}{K} \cdot \sum_{i=0}^{K-1} S_j[k]. \quad (6.6)$$

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

6.3 ČASOVĚ-FREKVENČNÍ OBLAST

Z frekvenční analýzy získáme informaci, jaké frekvenční komponenty 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.

6.3.1 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 [42]. Její definiční integrál je:

$$STFT_X^{(\omega)}(t', f) = \int_{-\infty}^{\infty} [x(t) \cdot g * (t - t')] \cdot e^{-i2\pi f(t-t')} \cdot dt, \quad (6.7)$$

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 [42].

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.

7 PROVEDENÁ MĚŘENÍ

V rámci disertační práce bylo provedeno 8 experimentálních měření metodikou popsanou v kapitole 5. Byly vybrány tři lokality žst. Poříčany, žst. Choceň a žst. Ústí nad Orlicí. Měření byla realizována jako srovnávací, tedy vždy se k měřené výhybce vybrala srovnávací konstrukce se srovnatelnými parametry (štíhlost, směr pojezdu většiny souprav, rychlost pojezdu souprav přes výhybku a skladba vlakové dopravy). Všechny vybrané výhybky byly v hlavních kolejích, kde je maximální rychlost 130 – 160 km·h⁻¹.

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). K výhybce č. 10 byla vybrána srovnávací výhybka č. 1 na stejném pečském zhlaví (směrem na Brno). Výhybka č. 1 má stejnou štíhlost (1:12 – 500), jedná se o výhybku, která je většinou vlaků pojížděna 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.

Měření v žst. Choceň bylo realizováno na podnět SŽDC, kdy s výhybkou č. 59 byly 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. Vybrané výhybky jsou součástí jednoduché kolejové spojky, soustavy železničního svršku UIC 60, na betonových pražcích, s upevněním na žebrových podkladnicích se svěrkami

Vossloh Skl 24. Obě jsou pojížděny proti hrotu, s úhlem odbočení 1:14, poloměrem odbočení 760 m a mají stejné srdcovky.

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 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, obě výhybky jsou až na uzel upevnění totožné (1:12 – 500, soustavy železničního svršku UIC 60, na betonových pražcích, výhybka č. 4 má upevnění na žebrových podkladnicích se svěrkami Vossloh Skl 24).

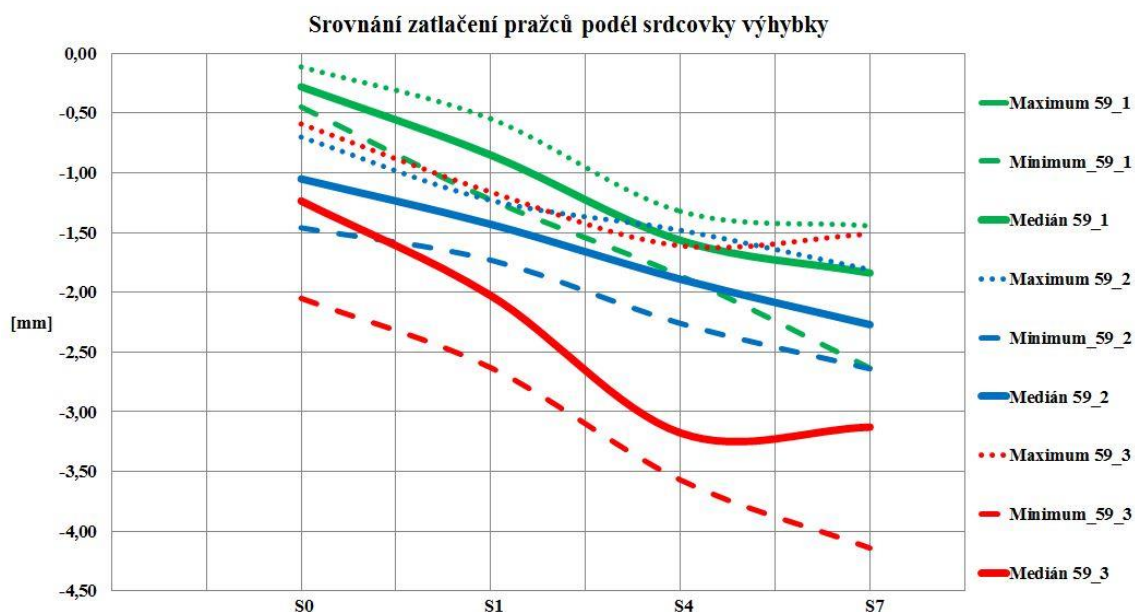
8 VYHODNOCENÍ PROVEDENÝCH MĚŘENÍ

Vyhodnocení měření je rozděleno do dvou bloků, tím prvním je pohybové chování výhybek a tím druhým je vyhodnocení zrychlení vibrací na konstrukci výhybek. U zrychlení vibrací jsem hodnotil zejména přenos vibrací z křídlové kolejnice, přes pražec až do šterkového lože. Hodnocení vibrací bylo dále rozděleno na část časovou, frekvenční a časově-frekvenční. Tímto způsobem byly získány komplexní informace o chování výhybek pod zatížením.

8.1 VYHODNOCENÍ POHYBOVÉHO CHOVÁNÍ KONSTRUKCE

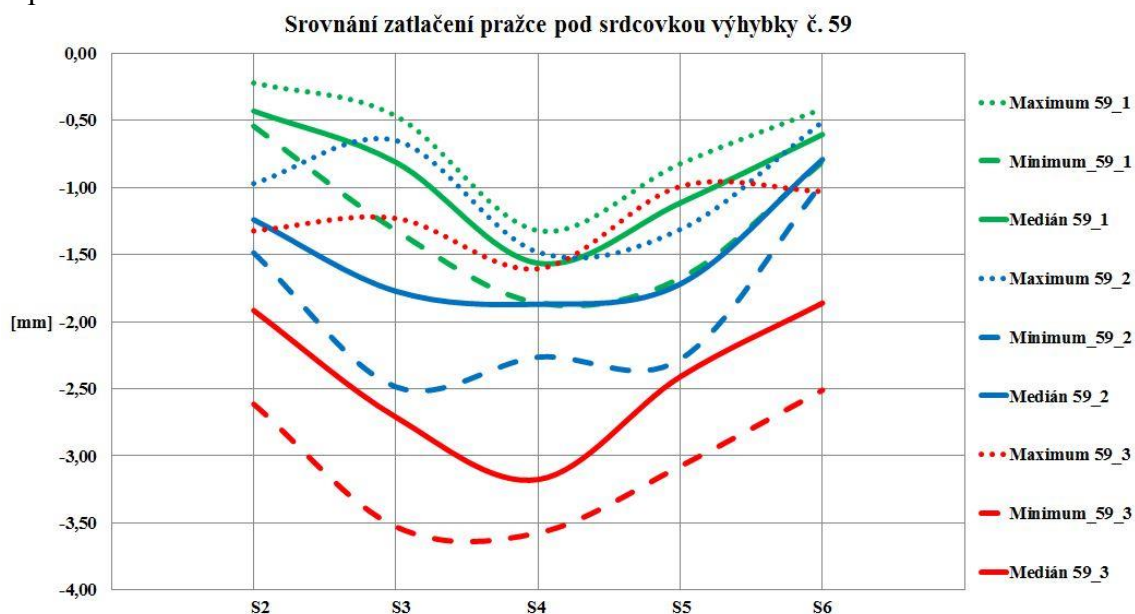
Pro prezentaci výsledků měření pohybového chování konstrukce jsem vybral srovnání tří měření na výhybce č. 59 v žst. Choceň. Po prvním měření byla srdcovka výhybky opravena navařením a před třetím měřením byla podbita. Pro každý průjezd vlaku přes měřené místo jsem na všech snímačích vybral maximální hodnotu zatlačení a z nich jsem pro každý vlak vykreslil „průhybové“ křivky pražce pod srdcovkou a pražců podél srdcovky výhybky. Pro tyto křivky jsem poté udělal obalové křivky, které odpovídají maximálnímu a minimálnímu zatlačení pražce a zobrazil jsem i hodnotu mediánu těchto křivek. Medián jsem vybral proto, že není ovlivněn okrajovými špičkovými hodnotami.

Na Obr. 8.1 jsou grafy průběhu zatlačení pražců podél srdcovky výhybky č 59 v žst. Choceň 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 připisuji vlivu dynamického rázu, který je v místě tohoto snímače největší.



Obr. 8.1 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. 8.2 jsou grafy průběhu zatlačení pražce pod srdcovkou výhybky č. 59 v žst. Choceň 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. 8.1) 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.



Obr. 8.2 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)

8.2 VYHODNOCENÍ ZRYCHLENÍ VIBRACÍ

Vyhodnocení zrychlení vibrací jsem rozdělil do tří částí. Vyhodnocení v časové rovině, vyhodnocení ve frekvenční rovině a vyhodnocení v časově-frekvenční rovině. Pro ukázkou vyhodnocení v časové rovině jsem vybral měření v Ústí nad Orlicí, kde jsem na několika porovnatelných vlcích, srovnal plochu pod křivkou klouzavé RMS. V Tab. 8.1 jsou hodnoty ploch pod křivkou klouzavé RMS, která je jistým ekvivalentem energie působícího signálu. Budu se zabývat 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.

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

Pro ukázkou vyhodnocení ve frekvenční rovině jsem vybral tři sady grafů, na kterých chci prezentovat frekvenční spektra Welchovou metodou na přechodu zrychlení vibrací z křídlové kolejnice do šterkového lože. První sada grafů je z měření v Poříčanech (Obr. 8.3), kde je vidět přínos uzlu upevnění s vulkanizovanými podložkami u výhybky č. 10. Druhá sada grafů je z tří měření na výhybce č. 59 v žst. Choceň (Obr. 8.4), kde je vidět zvyšující se dynamické namáhání konstrukce. Třetí sada grafů je z měření v Ústí nad Orlicí (Obr. 8.5), kde je srovnání nového uzlu upevnění TA 3718 s dnes běžně používaným uzlem.

Na základě vyhodnocených dat, teoretického rozboru a rešerše literatury (kapitola 4), lze vyslovit hypotézu, že výrazné frekvenční složky zrychlení kmitání mezi 35 Hz – 150 Hz jsou pravděpodobně projevem síly dynamické síly P_2 . To souhlasí i v tom pohledu, že tyto frekvenční složky jsou 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. 4.2). Přechod ve výhybce lze chápat jako určitou imperfekci o dané vlnové délce. Zrychlení kmitání na frekvencích mezi 200 Hz – 600 Hz by pak mohly být projevem síly P_1 . Tato složka se totiž nepřenáší celým systémem a je nejvýraznější na

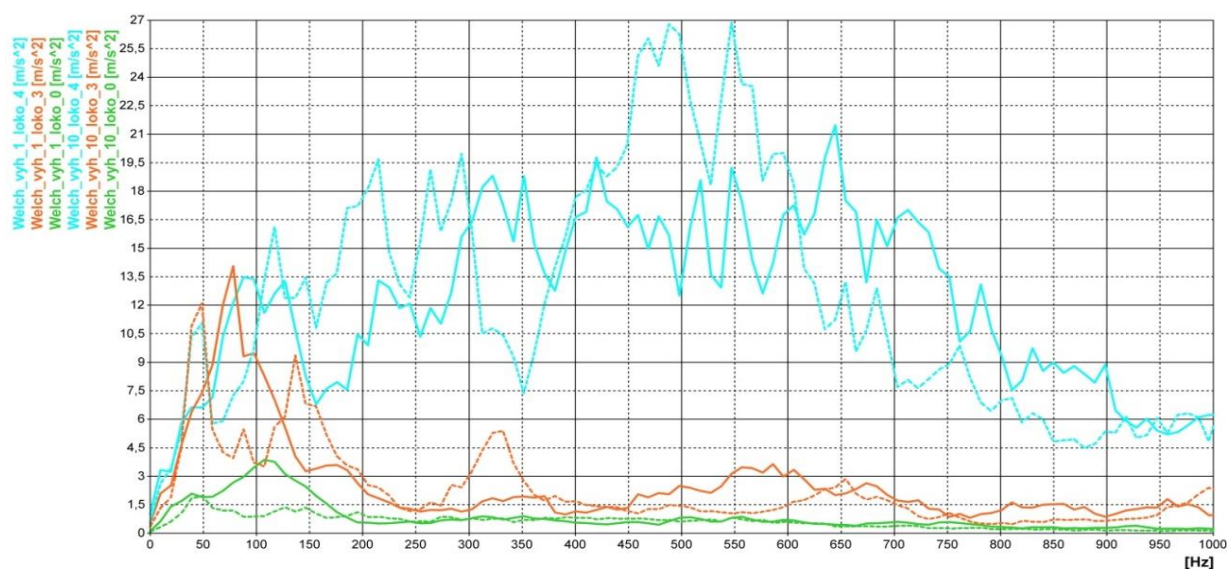
křídlové kolejnici, kde se projevuje zvýšeným kontaktním napětím, frekvenčně by to i odpovídalo teoretickému rozboru (kapitola 4). Všechny výše uvedené skutečnosti jsou patrné i na grafech uvedených níže (*Obr. 8.3, 8.4 a 8.5*).

Na první sadě grafů (*Obr. 8.3*) je vidět porovnání frekvenčních spekter na výhybce č. 1 a výhybce č. 10 (s vulkanizovanými podložkami) v žst. Poříčany. Tyrkysovou barvou jsou spektra na křídlové kolejnici, oranžovou spektra na pražci a zelenou spektra ve šterkovém loži. 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.

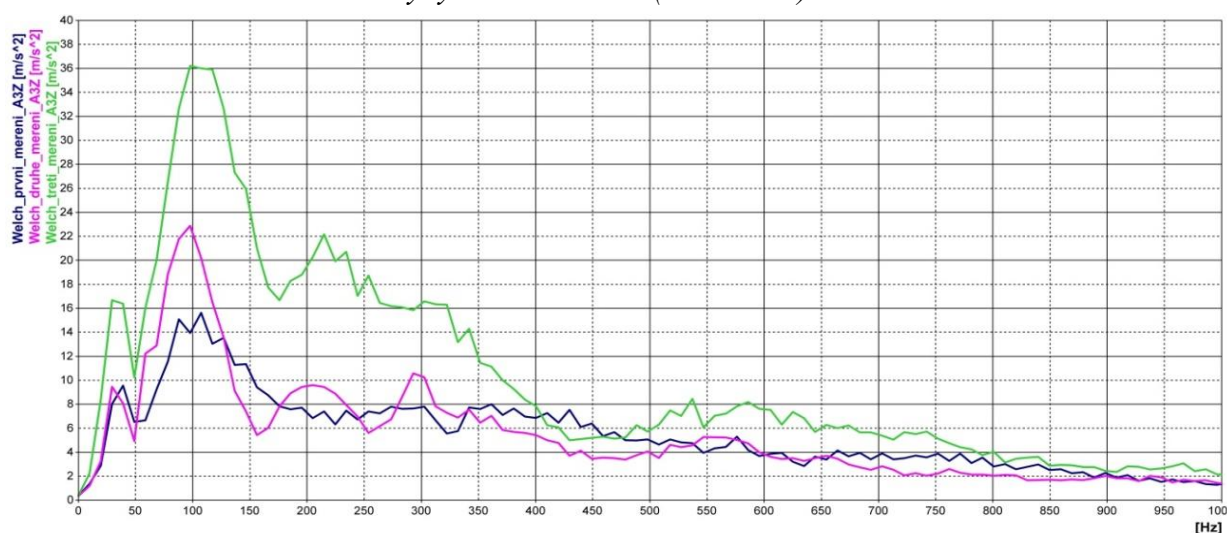
Na *Obr. 8.4* je srovnání tří měření na výhybce č. 59 v žst. Choceň. Vybral jsem srovnání frekvenčních spekter na pražci, kde je vidět, jak se zvětšujícím zatlačením pražců (*viz. Obr. 8.1 a 8.2*) se výrazně zvyšuje i zrychlení vibrací na frekvencích, které pravděpodobně odpovídají dynamické síle P_2 . Modrou barvou je první měření, fialovou druhé a zelenou třetí měření.

Na *Obr. 8.5* je srovnání frekvenčních spekter získaných ze snímačů na přechodu z křídlové kolejnice do šterkového lože na měření v Chocni. 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 (s uzlem upevnění TA3718). 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.

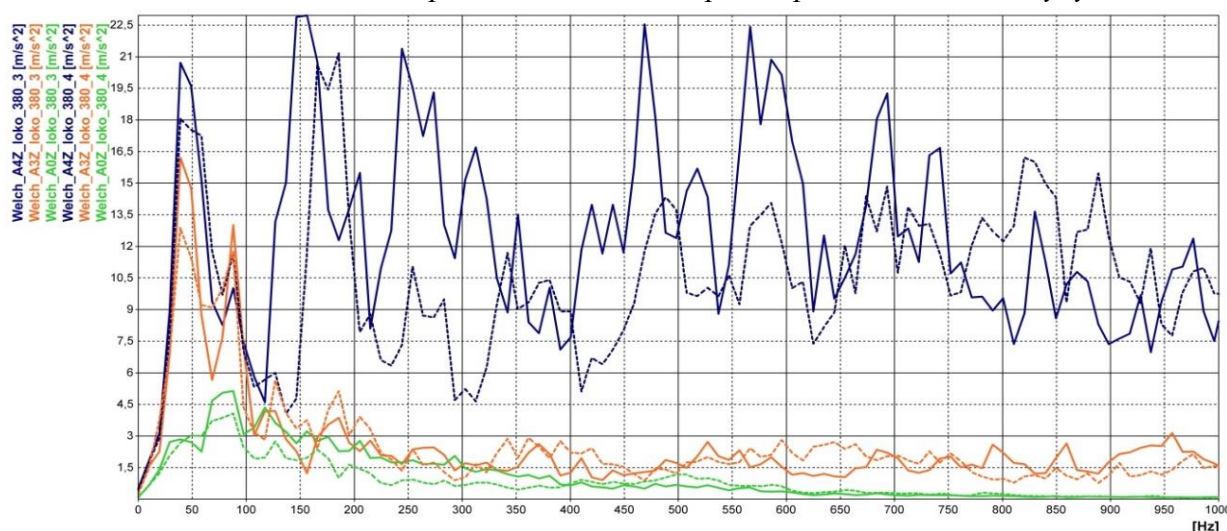
Pro ukázkou vyhodnocení (*Obr. 8.6*) v časově-frekvenční rovině jsem vybral hustotní spektrogram z měření v Chocni (výhybka č. 59, poslední měření). Na spektrogramu je vidět, že časově-frekvenční vyhodnocení odpovídá i frekvenční analýze, špičkové hodnoty zrychlení vibrací odpovídají průjezdu jednotlivých podvozků vlaku, maxima se objevují okolo 100 Hz – 150 Hz, tedy pravděpodobně odpovídají působení síly P_2 .



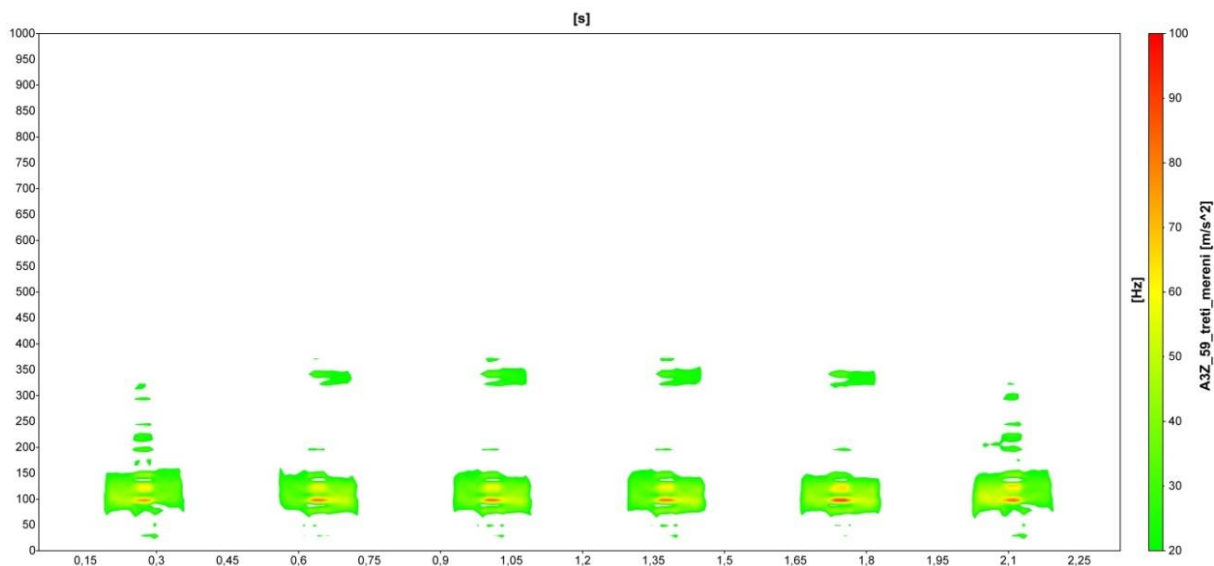
Obr. 8.3 Welchova metoda, srovnání přechodu z křídlové kolejnice do štěrkového lože na výhybce č. 1 a č. 10 (čárkovaně)



Obr. 8.4 Welchova metoda, porovnání měření na pražci pod srdcovkou na výhybce č. 59



Obr. 8.5 Welchova metoda, srovnání na přechodu z křídlové kolejnice do štěrkového lože, lokomotiva řady 380, výhybka č. 3 a 4



Obr. 8.6 STFT, na pražci u srdcovky výhybky č. 59, třetí měření

9 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. Další část je věnována shrnutí realizovaných měření z hlediska naplnění cílů práce.

9.1 STUDIUM DYNAMICKÝCH DĚJŮ VE VÝHYBCE

Z realizovaných 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.

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.

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.

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 měřeními 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 dvojkojí 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 podvozkem 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.

9.2 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 prokázala 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. Měření pomocí měřicích kamenů funguje zcela bez problémů. 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 ústředěn a měřicích karet, které jsou vybaveny čtyřmi měřicími kanály. První 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 přenesení do podélného směru. Třetím snímačem je snímač na pražci u srdcovky (A3Z). Z tohoto snímače je možné 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 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.

9.3 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 doporučuji 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.

9.4 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 pojezdné 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.

9.5 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 využít i levnějších komponent, aby se cena zařízení povedla stlačit co nejnižší. Zařízení by také mělo umožňovat zasílání 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.

9.6 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.

10 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 praktickou aplikací v provozu. Zde je stále prostor pro zlepšení spolupráce mezi SŽDC, podniky železničního průmyslu a univerzitami, která bude oboustranně prospěšná.

LITERATURA

- [1] *Príloha nařízení Komise (EU) č. 1299/2014, ze dne 18. listopadu 2014, o technických specifikacích pro interoperabilitu subsystému infrastruktura železničního systému v Evropské unii*
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] *Rail Switches and Crossings. Development of new technologies for replacement*. Projekt Mainline, 7th Framework Programme, Final report. 2014. Grant Agreement number 285121.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] NICKLISCH, D. *SIMPACK-simulations of passing switches and crossings*. December 2008. INNOTRACK Technical report.
- [11] NICKLISCH, D. *SIMPACK-simulations of contact stresses on switches and crossings*. July 2009. INNOTRACK Technical report.
- [12] 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.
- [13] *Recommendation of, and scientific basis for, optimisation of switches & crossings – part 1*. Projekt Innotrack. Deliverable report D3. 2011. Project No. TIP5-CT-2006-031415.
- [14] 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.

- [15] VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, ÚSTAV ŽELEZNIČNÍCH KONSTRUKCÍ A STAVEB. *Měření svislých pohybů a parametrů vibrací výhybkových pražců* – 2005. Brno, září 2005. Závěrečná zpráva. [24s, 10s příl.].
- [16] VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, ÚSTAV ŽELEZNIČNÍCH KONSTRUKCÍ A STAVEB. *Měření svislých posunů pražců a vibrací v oblasti srdcovky výhybky č. 21 v žst. Moravany*. Brno, říjen 2007. Závěrečná zpráva. [16s, 7s příl.].
- [17] *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.*
- [18] 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.
- [19] *Směrnice SŽDC č. 51 pro provádění prohlídek a měření výhybek*. 2008.
- [20] VYMLÁTIL, Petr. *Výpočtový model konstrukce železniční trati pro explicitní dynamickou analýzu*. Ostrava: Konference Modelování v mechanice, 2006. ISBN 80-248-1035-2.
- [21] 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.
- [22] PLETZ, M., W. DAVES, H. OSSBERGER. *A wheel set/crossing model regarding impact, sliding and deformation-Explicit finite element approach*, *Wear*. ISSN 00431648, 2012.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] PLÁŠEK, O. *Dynamické jevy v konstrukci koleje*. 30.10.2006. Habilitační přednáška. [30 s].
- [29] 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.
- [30] WIEST, DAVES, FISCHER, OSSBERGER. *Analýza přejíždění srdcovky metodou konečných prvků. ZEV rail Glasers Annalen 11-12/2005*. ISSN 1618-8330.
- [31] VUKUŠIČ, I. *Srovnání dynamických účinků na výhybkách*. 12. Odborná konference doktorského studia JUNIORSTAV 2010. ISBN 978-80-214-4042-5.

- [32] 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.
- [33] SMUTNÝ, J., I. VUKUŠIČ a V. TOMANDL. Analýza dynamických parametrů výhybek. *Stavební obzor*. Praha: FAST ČVUT, 2010. ISSN 1210-4027.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] LIEBERENZ, K. a U. WEISEMANN. *Geokunststoffe in dynamisch belasteten Erdbauwerken an Eisenbahnstrecken*. Rail International – Schienen der Welt, Dezember 2002. S. 30–39.
- [38] 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.].
- [39] SMUTNÝ, J., I. VUKUŠIČ a V. TOMANDL. Zkušenosti z experimentálního měření dlouhých výhybkových pražců. In: *Vědeckotechnický sborník Českých drah*. Praha: Generální ředitelství Českých drah, Nábřeží L. Svobody 1222, Praha, 2010. ISSN 1214-9047.
- [40] NOVÝ, R. *Hluk a chvění*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. [389 s]. ISBN 80-01-02246-3.
- [41] 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.
- [42] 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.

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.

Curriculum Vitae

Jméno: **Ing. Ivan Vukušič**

Narozen: 10. září 1981 v Brně, Česká republika

Vzdělání:

1998 – 2001	Střední průmyslová škola stavební, Brno
2001 – 2007	Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební obor konstrukce a dopravní stavby zaměření Železniční konstrukce a stavby
2007 – doposud	Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební interní postgraduální studium

Odborná praxe:

7/2007 – doposud	Výzkumný Ústav Železniční, a.s. specialista pro železniční infrastrukturu posuzovatel a hlavní posuzovatel shody výrobků s TSI Předseda mezinárodní pracovní skupiny Infrastructure NB – Rail koordinátor notifikovaných osob za subsystém Infrastruktura
------------------	---