

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta stavební
Ústav železniční konstrukcí a staveb

Ing. Vladimír Tomandl

**EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA VYBRANÝCH SYSTÉMŮ
KOLEJNICOVÝCH UPEVNĚNÍ**

Experimental Analysis of Chosen Railway Fastening Systems

Zkrácená verze PhD Thesis

Obor: Konstrukce a dopravní stavby

Školitel: prof. Ing. Jaroslav Smutný, Ph.D.

Oponenti:

Datum obhajoby:

Klíčová slova

Běžná kolej, konstrukce železničního svršku, upevnění kolejnic, měření hluku a vibrací, dynamické účinky

Keywords

Plain line, track structure, rail fastening, noise and vibration measurement, dynamic effects

Místo uložení dizertační práce

Ústav železničních konstrukcí a staveb, Fakulta stavební, VUT v Brně

OBSAH

1	ÚVOD	5
1.1	Provozní ověřování upevnění kolejnic	6
1.2	Cíle práce	7
2	DYNAMICKÉ A AKUSTICKÉ DĚJE V KOLEJI	12
3	METODIKA MĚŘENÍ	16
3.1	Laboratorní měření	17
3.2	Měření in situ	18
4	MATEMATICKÝ APARÁT	21
4.1	Analýza v časové oblasti	21
4.2	Analýza ve frekvenční oblasti	22
4.3	Analýza v časově-frekvenční oblasti	23
5	VÝBĚR VHODNÉHO STANOVIŠTĚ MĚŘENÍ	23
6	REALIZACE A VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ	26
6.1	Laboratorní měření	27
6.2	Měření in situ	29
7	ZÁVĚRY A DOPORUČENÍ	32
7.1	Konfigurace zařízení na měření dynamických účinků	34
7.2	Doporučení	36
8	BIBLIOGRAFIE	37
8.1	Související publikace autora	38
9	CURRICULUM VITAE	39
10	ABSTRACT	40

1 ÚVOD

Železniční doprava prošla od svého vzniku velkým vývojem. Neustále se zvětšující nároky na traťovou rychlost, resp. na nápravové zatížení vedly ke snaze o zvyšování únosnosti železničních konstrukcí. S tím je úzce spjat také požadavek na větší tuhost konstrukčních vrstev železničního spodku a zemní pláně. Plošné rozšíření bezстыkové koleje a nedostatek kvalitního dřeva navíc způsobily, že betonové pražce v průběhu několika posledních desetiletí prakticky nahradily dříve používané pražce dřevěné. Betonové pražce mají mnohem větší ohybovou tuhost a menší pružnost. Tyto aspekty přispívají k většímu namáhání kolejového lože, které se od počátků železnice principiálně téměř nezměnilo.

Pražce se podbíjejí štěrkem zejména v oblastech úložných ploch. Po určitou dobu od podbití zaujímají zrna štěrku vzpřímenou polohu. Jejich vzájemné zaklínění pak přispívá k optimálním pružně tlumícím vlastnostem kolejového lože. Opakovaným zatěžováním betonového pražce dochází k postupné distribuci zrn kolejového lože do polohy ležmo. Tento jev bývá také často doprovázen obrušováním zrn štěrku a s ním spojeným zanášením kolejového lože nežádoucím jemnozrnným materiálem. Kolejové lože tak částečně ztrácí své pružně-tlumící vazby. Oblast uložení pražce se postupně přesouvá od jeho okrajů směrem ke středu. Při průjezdu vlaku je pak ložná plocha pražce dotlačována na lavičku kolejového lože a mezi pražcem a lavičkou vznikají volné prostory. Tento jev bývá doprovázen zvýšenými dynamickými účinky působícími na celou konstrukci koleje, což vede ke zpětnému urychlení celého procesu. Aby se těmto nežádoucím dějům co nejvíce zamezilo, jsou požadovány zvýšené nároky na použité materiály (obecné technické podmínky a technické podmínky dodací), resp. na kvalitu prováděných prací (technické kvalitativní podmínky). V průběhu životnosti konstrukce jsou vkládány nemalé finanční prostředky do diagnostiky kvality koleje a její případné údržby. Mezi zásadní kvalitativní ukazatele pak patří kvalita geometrie koleje [1 - 3].

Uvedené skutečnosti jsou příčinou snahy o zdokonalování konstrukcí železničního svršku a uzpůsobení jejich vlastností s ohledem na podmínky, v nichž mají být použity. Proces vývoje a zkoušení každého takového výrobku lze rozdělit do čtyř základních etap od konstrukčního návrhu výrobku, přes teoretickou analýzu (modelování), laboratorní zkoušení (zkoušky typu, kontrolní výrobní zkoušky) až po provozní ověřování. Jednotlivé etapy vývoje a zkoušení výrobku jsou navzájem provázány. Na základě zjištění z teoretického modelu vytvořeného dle konstrukčního návrhu může dojít ke zpětné úpravě tohoto návrhu. Výsledky laboratorních zkoušek nebo provozního ověření mohou přispět ke zpřesnění matematického modelu, apod.

Požadavky na vlastnosti konstrukce stanovují evropská a vnitrostátní pravidla, příp. pak požadavky koncového uživatele. Pro systémy upevnění kolejnic lze uvést normy řady ČSN EN 13481. Důležitým aspektem při rozhodování o výběru a použití nového konstrukčního prvku je teoretická analýza. Účinky kolejových vozidel na konstrukci tratě se řeší jako interakční účinky dvou mechanických soustav – pohybujícího se kolejového vozidla a konstrukce tratě. Všeobecně jde

o řešení složité dynamické úlohy, ve které konstrukce tratě vystupuje jako mechanická soustava tvořená kolejovým roštem a pražcovým podložím. Tato konstrukce je typickou prostorovou 3D soustavou modelovanou zpravidla jako jednodušší rovinná 2D soustava. Kontakt mezi kolem a kolejnicí zpravidla vyjadřuje tuhost Hertzovy pružiny. Kolejnice a pražce jsou charakterizovány ohybovou tuhostí. Podložky pod patu kolejnice jsou modelovány užitím soustavy pružin a tlumičů. Začínají se uplatňovat modely s přidanou pružinou do mechanismu tlumiče. Tyto modely dokáží lépe zohledňovat proměnné vlastnosti podložek v čase a v závislosti na frekvenčním působení zátěže. Kolejové lože a podloží je obvykle modelováno podle Winklerovy hypotézy. Rozlišujeme mezi základními modely statických (např. nekonečný prut na pružném podkladu, dvouprutový model s kontinuálním pružným uložením a tlumením, Pasternakův model apod.) a dynamických výpočtů. I nejjednodušší modely pak zahrnují jak model koleje, tak i model kolejového vozidla. V teoretických řešeních úloh mechaniky tratě má mimořádný význam koncepce přenosové funkce, protože představuje efektivní charakteristiky pseudolineární soustavy, které se využívají i při všeobecném buzení, resp. při stochastické analýze konstrukce tratě nebo interakční soustavy kolejové vozidlo – trať. Frekvenční odezvová funkce FRF je určena hmotností, tlumením a tuhostí. Tyto parametry určují vlastní frekvence. Pokud se v zatížení vyskytne složka s touto frekvencí, projevuje se vysokými dynamickými účinky. Teoretická analýza konstrukčních prvků železničního svršku bývá současně podpořena laboratorními zkouškami na hotovém výrobku. U vybraných konstrukcí železničního svršku však ani laboratorní analýza nemusí přinést průkazné výsledky. Tehdy je vhodné na přání uživatele doplnit validační proces výrobku o měření in situ, v případě kolejového roštu tedy přímo na trati [4 - 9].

1.1 PROVOZNÍ OVĚŘOVÁNÍ UPEVNĚNÍ KOLEJNIC

Postup porovnávacího zkoušení systémů upevnění v koleji stanovuje norma ČSN EN 13146-8. Norma vyžaduje dlouhodobé sledování testované konstrukce v minimálním trvání jednoho roku současně při dosažení předepsaného dopravního zatížení. Během této doby je doporučeno průběžné sledování vybraných parametrů a následné porovnání s referenční sestavou, která byla vložena do stejné koleje a ve stejném časovém období jako sestava testovaná. Normou uváděné parametry jsou v naprosté většině případů posuzovány buď měřením bez zatížení, příp. pouze na základě vizuální prohlídky. Pod zatížením je možné v rozsahu stanoveném normou prakticky hodnotit pouze rozchod koleje či stav hlavy kolejnice. Podmínkou je dostupnost měřicího vozu pro železniční svršek. Ta je vzhledem ke lhůtám měření na dráze stanoveným vyhláškou č. 177/1995 Sb. velmi omezená [1, 10].

Důležitou oblast experimentální analýzy představuje hodnocení dynamických a akustických parametrů konstrukcí železničního svršku na základě jejich odezvy na účinky buzení. Tyto parametry jsou zjišťovány nejčastěji v zatíženém stavu. Zatížení je dáno zpravidla reálným vozidlem. Dle charakteru pohybu vozidla rozlišujeme kvazistatické nebo dynamické zatížení. Hodnocení dynamických

a akustických účinků na železniční svršek, příp. na jeho jednotlivé části, je možné v zásadě rozdělit na:

- analýzu silového působení a napětí v konstrukci;
- analýzu posunů vyvolaných zatížením konstrukce;
- analýzu šíření vibrací a jejich účinků na okolí trati;
- analýzu šíření hluku a jeho účinky na okolí trati.

Metody dynamické a akustické analýzy lze navíc z hlediska jejich účelu rozčlenit na hygienická, příp. technická měření. Hygienická měření mají za cíl určit míru škodlivosti a vlivu dopravy na životní prostředí. Postupy měření jsou definovány příslušnými technickými normami, hygienické limity pak národní legislativou. Technická měření mají odhalit slabé stránky konkrétní konstrukce. Mají predikovat dlouhodobé chování zkoumané konstrukce za provozu a odhadnout jeho vliv na údržbu a přidružené konstrukce. Metody pro technická určování dynamických a akustických parametrů in situ jsou obecně známy. V konzervativním prostředí železnice však nejsou příliš používány. Neexistuje navíc jejich vzájemná koordinace. Měření bývají obvykle v režii jednotlivých výrobců. Ti si pak často nastavují systém a deskriptory diagnostiky tak, aby získané výsledky byly pro daný výrobek co nejpříznivější. Častým nedostatkem těchto měření bývá také absence uvedení podmínek měření, apod.

1.2 CÍLE PRÁCE

Těžištěm dizertační práce je z výše uvedených důvodů studium přenosu dynamických a akustických účinků zatížení kolejovou dopravou do konstrukcí železničního svršku, zejména se zaměřením na systémy upevnění kolejnic. Cíle práce lze shrnout do následujících kroků:

- shrnutí aktuálního stavu teoretických poznatků ohledně dynamických a akustických dějů v koleji;
- návrh metodiky měření a matematického aparátu k vyhodnocení získaných údajů;
- výběr vhodných lokalit pro měření včetně návrhu metodiky pro určení konkrétního měřicího profilu;
- realizace měření in situ, příp. in labo;
- studium dějů chování vybraných konstrukcí upevnění pod vlivem účinků dynamického zatížení;
- vyhodnocení výsledků případových studií;
- poskytnutí výstupů z měření nezávislou organizací správci dráhy, resp. jednotlivým výrobcům a poskytnutí vstupních údajů pro tvorbu a zpřesňování výpočtových modelů;
- kompletace vybavení pro uskutečňování laboratorních zkoušek, doplnění aparatury pro měření in situ, doplnění měřících postupů vyvolaných požadavky technické praxe;

- optimalizace a zobecnění metodiky měření a vyhodnocení pro širokou oblast použití;
- doplnění zásad pro zakládání a vyhodnocování zkušebních úseků včetně vytvoření rukověti pro použití jednotlivých systémů upevnění kolejnic;
- vývoj měřicího zařízení pro dlouhodobou instalaci do tělesa tratě s možností zapojení do systému centrálního dohledu diagnostiky závad jedoucích vozidel.

Z důvodu účelného navržení metodiky měření a aparátu k vyhodnocení a analýze dynamicko-akustických účinků vozidla na trať je důležité pochopit základní principy jejich vzniku a šíření konstrukcemi železniční trati. Je zásadní vědět, jak velkému zatížení musí konstrukce upevnění odolávat v reálném provozu a jak na toto zatížení reaguje [11 - 16].

Technická měření dynamických a akustických parametrů konstrukcí železničního svršku lze provádět jednak laboratorně a jednak in situ. Největšími výhodami laboratorních měření je možnost zajištění referenčních podmínek pro různé měřicí kampaně, snadnější příprava a organizace během měření a dobrá opakovatelnost měření. Nevýhodou je potom skutečnost, že daná měření neodpovídají zcela přesně reálným podmínkám a že lze jen velmi těžko simulovat skutečné dopravní zatížení. U měření in situ jsou výhody a nevýhody převážně opačné. Z uvedeného tedy vyplývá, že laboratorní zkoušky je výrazně jednodušší standardizovat. Uskutečněná laboratorní měření mají za cíl především porovnat mezi sebou jednotlivé testované konstrukce upevnění kolejnic, zjistit významné frekvence příp. rezonanční pásma a určit útlumy na těchto frekvencích. Měření in situ pak mají prokázat chování sledovaných konstrukcí v reálných podmínkách při zatížení železniční dopravou a určit způsoby, kterými se dynamické a akustické účinky projevují. Současně mají posloužit ke srovnání s výsledky z laboratoře. Jedině na základě takovýchto znalostí je možné stanovit vhodná konstrukční opatření vedoucí k omezení negativních vlivů železniční dopravy a určit vhodné způsoby monitoringu a údržby. Na základě rešeršní činnosti a předchozích zkušeností jsem navrhl metodiku měření včetně výběru vhodných měřicích pomůcek a zařízení. Vstupními požadavky bylo, aby výsledná metodika měření byla dostatečně komplexní pro vyšetření všech očekávaných stěžejních dějů v konstrukci a umožňovala jejich snadnou interpretaci, aby umožňovala univerzální použití pro různé konstrukční systémy, aby umožňovala snadnou instalaci v trati bez omezování provozu, aby zajistila bezpečnost provozu a práce měřické skupiny, aby byla neinvazivní vůči vyšetřované konstrukci a konečně, aby umožňovala dostatečnou přesnost, opakovatelnost a reprodukovatelnost měření. Mezi dodatečné požadavky na měření in situ patřilo, aby zvolená metodika měření umožnila přípravu, vlastní měření a vyklizení měřicího stanoviště během 7,5 hodinové pracovní doby. Tento požadavek byl vyvolán potřebou zajistit střežení daného stanoviště drážním zaměstnancem na základě požadavku správce dráhy.

Při měření dynamických a akustických účinků od kolejových vozidel v terénu nebo od budicího impulsu v laboratoři je zapotřebí popsat a vyhodnotit stochastický

a přechodový signál. Práce s takovými signály může být poměrně obtížná a jejich objektivní hodnocení vyžaduje použití moderních matematických postupů. Metody a parametry hodnocení naměřeného signálu lze rozčlenit do tří následujících oblastí:

- časové zobrazení pohybů kolejového roštu a průběhu kmitání, dále extrémů pohybů kolejového roštu a kmitání, efektivní hodnoty kmitání a další statistické veličiny (střední hodnota, crest faktor, medián, n-procentní kvantil, apod.) nebo standardizované deskriptory hluku;
- frekvenční analýza hluku a vibrací s využitím průběhu amplitudového spektra – pro přechod z časové do frekvenční oblasti je využit algoritmus rychlé Fourierovy transformace či dalších průměrovacích metod založených na aplikacích rychlé Fourierovy transformace, jako jsou např. algoritmus Welchovy metody nebo různé typy frekvenčních přenosových funkcí;
- časově-frekvenční spektrální analýza vibrací – pro přechod z časové do časově-frekvenční oblasti lze použít algoritmy lineárních či nelineárních transformací. Zásadní výhodou první skupiny je zejména rychlost výpočtu a uspokojující časově frekvenční rozlišení. Hlavní nevýhodou lineárních transformací je skutečnost, že výsledné rozlišení v čase a frekvenci je limitováno tzv. Heisenbergovým principem neurčitosti. Mezi nejznámější časově-frekvenční transformace patří metoda Krátkodobé Fourierovy transformace a transformace Wawelet. Z nelineárních metod byly teoreticky popsány a k praktickému vyhodnocení využity jednak časově-frekvenční transformace z Cohenovy třídy (konkrétně transformace Wigner-Villeho, Rihaczek, Page, Born-Jordanova a Margenau-Hillova) a jednak afinní časově-frekvenční transformace (konkrétně Bertrandova, D-Flandrinova a Unterbergerova transformace). Výsledné rozlišení všech nelineárních transformací není limitováno Heisenbergovým principem neurčitosti. Jistou nevýhodou těchto nelineárních postupů je však časová náročnost výpočtu a nároky na relativně velkou operační i diskovou paměť počítače. Další nevýhodou některých nelineárních transformací při zpracování určitých typů časových realizací může být existence „falešných“ interferenčních frekvenčních komponent. Jejich vliv je možné zmírnit vhodnou volbou tzv. jádrové funkce, případně použitím tzv. vyhlazené transformace, kdy vlastnosti dané nelineární transformace se ovlivní použitím vhodné lokální okénkové funkce.

Metody časového zobrazení poskytují užitečné prvotní informace o testovaném signálu. Z hlediska analýzy pohybů kolejového roštu se jedná o plnohodnotné informace. Pro podrobnou analýzu a rozbor hluku a vibrací jsou však tyto informace nedostačující, neboť neodkrývají frekvenční složení signálu. Z tohoto důvodu je vhodné převedení signálu z roviny časové do roviny frekvenční. Ve frekvenční oblasti je možné provést rozbor jednotlivých frekvenčních složek obsažených v hodnoceném signálu. Pro získání dalších informací o daném signálu lze použít ještě třetí rovinu vyhodnocení, a sice rovinu časově-frekvenční. V této rovině je

možné sledovat nejen frekvenční složení signálu, ale také výskyt frekvenčních složek v čase [17 - 21].

Výběr měřicích lokalit in situ probíhal podle předem definovaných podmínek. Byly vybírány úseky tratí s referenčními charakteristikami, nejlépe zkušební úseky kvůli jejich dobrému zdokumentování nebo samotné přítomnosti testované konstrukce. Sledovanými charakteristikami se rozumí např. konstrukční a geometrické uspořádání koleje nebo stáří vložené konstrukce. Úseky musí být lehce dostupné pro přesun měřicí techniky, bezpečné pro realizaci měření a musí být srovnatelné z hlediska výsledného přepočteného provozního zatížení, sestavy vozidel a jejich jízdní rychlosti, apod. Vybrané tratě nesmějí být nepříznivě ovlivněny vnějšími faktory, jako je přítomnost umělých staveb, mimořádné terénní podmínky, aj. Pro účely mé dizertační práce bylo nutné nalézt mechanismus výběru měřicích stanovišť na stávajících tratích v analogii s výběrem místa vhodného pro zřízení zkušebního úseku. S ohledem na výše uvedené skutečnosti byl stanoven následující postup pro výběr měřicího stanoviště [22 - 28]:

- lokalizace vhodného úseku dle projektové dokumentace nebo nákrešného přehledu železničního svršku (NPŽSv) a na základě znalosti grafikonu vlakové dopravy;
- ověření kvality geometrie koleje na základě výstupů z měřicího vozu nebo měřicí drezíny pro železniční svršek;
- charakterizace dynamických vlastností úseku koleje při průjezdu vozidla (drsnost kolejnice, stupeň dynamického útlu trati TDR);
- určení konkrétního měřicího profilu na základě predikce kvality podepření pražců.

Na základě stanovené metodiky měření a výběru vhodné lokality byla uskutečněna vlastní měření. Celkem bylo takto realizováno v letech 2007 až 2015 více než třicet rozsáhlých měření. Řada z nich byla prováděna z podnětu správce dopravní cesty, příp. z podnětu výrobců nebo distributorů součástí železničního svršku. K vyhodnocení dynamicko-akustických parametrů in situ sloužily pouze záznamy od reprezentativních vozidel. Pozornost byla věnována zejména srovnatelné jízdní rychlosti nebo vyvolanému nedostatku převýšení v koleji v oblouku, uspořádání náprav a nápravovému zatížení. Vyhodnocení měření bylo provedeno ve třech rovinách – v časové, ve frekvenční a v časově-frekvenční. Vyhodnocení jsou založena na metodě přehledových tabulek a grafů, kdy z globálních výstupů měření byly určeny vybrané reprezentativní parametry. K měřením je v dizertační práci vyhotovena přílohová část obsahující vybrané grafy, tabulky a fotodokumentaci. Uvedená měření jsou svým rozsahem a hloubkou zpracování v poměrech České republiky unikátní.

Na základě vyhodnocení případových studií jsem vytvořil ucelený přehled o chování vybraných typů upevnění kolejnic. Jmenovitě se jednalo o upevnění určená pro instalaci na betonové pražce Vossloh W14, W 14NT, E 14, W 21NT, W 28NT, Pandrol FC I a pružné podkladnicové upevnění KS. Dále bylo ověřováno upevnění pro ocelové Y pražce S 15 a systém Vossloh 300 určený pro PJD. Všechny

sestavy upevnění byly v soustavě UIC 60. Upevnění W 21NT bylo v době realizace měření ve stádiu provozního ověřování v rámci systému péče o kvalitu. Upevnění W 28NT se provozně ověřuje dodnes, byť v trochu jiné konfiguraci. Informace obdobného charakteru nebylo možné z dostupných zdrojů dosud získat. Některé tuzemské, ale především zahraniční práce poskytovaly pouze dílčí výsledky a jednotlivé práce nebyly spolu nikterak provázány. Správce dopravní cesty tak získává cenné údaje z nezávislého sektoru, s eliminací příp. „vylepšení“ ze strany výrobců nebo distributorů součástí železničního svršku. Vývojářům a výrobcům komponentů upevnění kolejnic je zase poskytnut nástroj pro optimalizaci vstupních údajů výpočtových modelů a zpětná vazba na jimi získané výsledky. Pro potřeby školy jsou vybudovány základy pro další výzkumnou činnost daného charakteru.

Uskutečněná měření poukázala na nutnost doplnění měřicího vybavení a optimalizaci měřících postupů a vyhodnocení. Tato zlepšení byla v průběhu provádění měření postupně aplikována, odzkoušena a připravena k dalšímu použití. Současně s tím jsou nastíněny možnosti vhodného doplnění, příp. zjednodušení měřících postupů. V rámci určování dynamických vlastností při výběru vhodných úseků měření je nově k dispozici přístroj pro měření drsnosti kolejnic, který byl ÚŽKS zajištěn v rámci vybavení výzkumného centra AdMaS (Advanced Materials, Structures and Technologies). V rámci metodiky měření byl optimalizován přípravek pro fixaci snímačů posunutí. Byly vyrobeny měřicí kameny vhodné pro dlouhodobou instalaci do kolejového lože. Jako alternativa k buzení rázovým kladivem byl pořízen vibromotor a navržen a vyroben přípravek k jeho upevnění na hlavu pražce. Dále byla sestavena aparatura pro buzení ocelovou kuličkou z předem definované výšky prostřednictvím zapínacího magnetického držáku. V neposlední řadě byly navrženy postupy pro spouštění a ukončení záznamu měřeného vozidla pomocí světelných bran a fotoelektrické sondy a navržena metodika měření pro objasnění vlivu rychlosti na velikosti dynamických účinků vhodná pro zkušební železniční okruh ve ZC Velim. Pro vyhodnocení dynamických vlastností zkušební místa v rámci metodiky výběru vhodného zkušebního stanoviště byla doporučena provozní metoda stanovení stupně dynamického útlumu TDR Pass-by-Analysis. Metoda je založena na iteračních postupech energetického obsahu záznamu průjezdu celé soupravy v poměru k jedné její zvolené nápravě a je součástí nově schvalovaného technického předpisu CEN/TR 16891.

Aby byla komplexní metodika měření in situ přiblížena co nejširšímu spektru potenciálních uživatelů, je žádoucí ji zjednodušit při zachování potřebné vypovídací hodnoty. Výsledky uskutečněných měření a vyhodnocení poukázaly na možnost sjednocení metodiky bez ohledu na to, zda se měřicí stanoviště nachází v přímé či v oblouku. Zjednodušená metodika se sestává ze čtyř kanálů pro měření posunutí, devíti kanálů pro měření zrychlení vibrací a dvou kanálů pro měření hluku. Pro kontinuální (stacionární) měření jsem pak navrhnul ještě úspornější metodiku založenou pouze na zeštíhleném modulu vibrodiagnostiky. Základem je použití čtyř kanálů pro měření zrychlení vibrací. Metodika umožňuje použití nově navrženého měřicího zařízení určeného k dlouhodobé instalaci do tratě, viz kapitola 7.1.

Státní správce dráhy v České republice má zavedeny postupy systému péče o kvalitu výrobků používaných na železniční dopravní cestě. Součástí postupu je rovněž provozní ověřování prototypu výrobku, počáteční série či technologického procesu. O nutnosti provozního ověřování rozhoduje pověřený útvar správce dráhy. Ten rovněž stanovuje v součinnosti s výrobcem nebo dodavatelem výrobku, příp. zhotovitelem technologického procesu podmínky a požadavky na zřízení ověřovacích úseků. Ty jsou vybírány prakticky pouze na základě odborného odhadu – neexistují implicitně stanovená pravidla výběru. Volí se nejčastěji náročné provozní podmínky, aby sledovaná konstrukce prokázala své vlastnosti dostatečně. Při výběru ověřovacích úseků se zohledňují také obecné technické podmínky daného výrobku. Jelikož je zřízení zkušebních úseků v rámci novostaveb organizačně náročné a je s ním nutné počítat již při návrhu, většinou se pro tyto účely volí stávající tratě. V rámci práce jsem na základě získaných zkušeností sestavil zásady pro zřizování zkušebních úseků a jejich parametry umožňující bezpečné a pohodlné měření. Zásady doplňují obecná ustanovení norem ČSN EN 13146-8 a ČSN ISO 3095, definují požadavky na zkušební úseky na trati, požadavky na provedení a vybavení měřicího stanoviště, požadavky na prováděná měření a požadavky na správu a údržbu zkušebních úseků [29, 30].

2 DYNAMICKÉ A AKUSTICKÉ DĚJE V KOLEJI

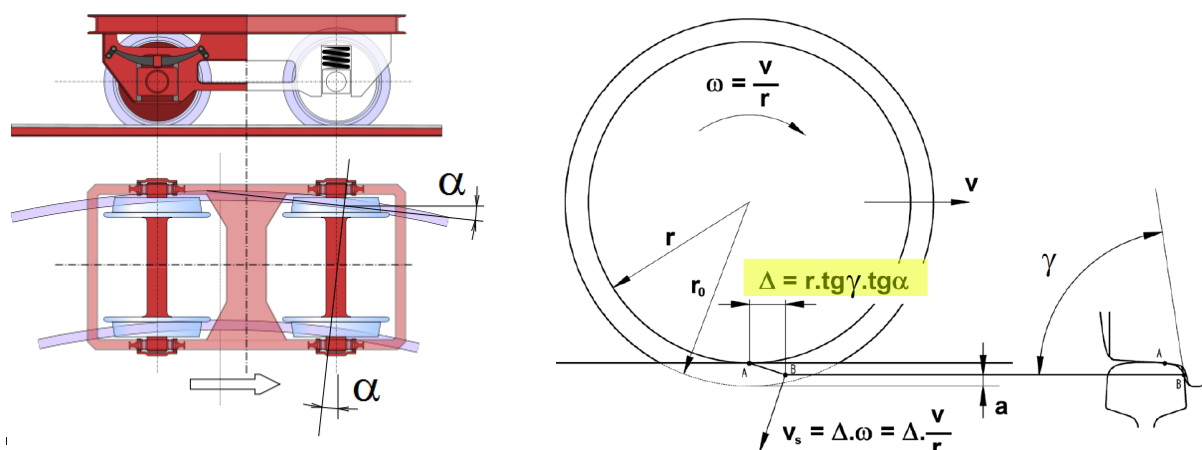
Dynamické zatížení tratě od kolejové dopravy lze dle svého charakteru a časového průběhu chápat jako zatížení periodické, stochastické a rázové. Účinky takového zatížení se šíří kolejovým roštem, šterkovým ložem a konstrukčními vrstvami železničního spodku v podobě vibrací do podloží. Tehdy je označujeme jako technickou seismicitu od povrchové nebo podpovrchové železniční dopravy. Část účinků dynamického zatížení je však vyzářena vzduchem v podobě podélného mechanického kmitání. V tomto případě hovoříme o hluku z kolejové dopravy.

Vlastnosti pohybu volného dvojkolí v přímé koleji i obloucích jsou určeny především geometrií dvojkolí a koleje v příčném směru a tvary příčných profilů hlav kolejnic a jízdních obrysů kol – kontaktní geometrie dvojkolí – kolej. Dalšími ovlivňujícími parametry jsou např. konstrukce vedení dvojkolí, hmotnost a rozměry kolejového vozidla, způsob vypružení a tlumení vazeb na vozidle, rychlost jízdy, skluzové charakteristiky a elasticita styku kolo – kolejnice.

V případě jízdy železničního vozidla přímou nebo obloukem o velmi velkém poloměru není železniční dvojkolí vedeno žádnou silou. V místech, kde přímá kolej bezprostředně navazuje na směrový oblouk případně v místech výskytu lokálních závad směru koleje, dochází k vychýlení dvojkolí železničního vozidla z centrické polohy. Při takovém vychýlení běží vlivem kuželovitosti oběžné plochy obruče jedno kolo ke kolejnicovému pásu po větším poloměru. Kolo na této straně tedy vykoná ve stejném čase delší dráhu než kolo opačné, což způsobuje natočení dvojkolí. Natočené dvojkolí má následně tendenci přiblížit se k druhému kolejnicovému pásu. Při opakujících se střídavých změnách v rozdílu velikosti poloměrů otáčení kol se volné dvojkolí pohybuje v sinusové křivce s podélnou osou

totožnou s osou koleje. Tvar sinusového pohybu je možné popsat tzv. Klingelovým vztahem a je závislý na poloměru kola, vzdálenosti rovin styčných kružnic a úkosu jízdní plochy. Čím je jízdní plocha méně ukloněná, tím je sinusová vlna delší. Zvyšuje-li se rychlost vlaku, zkracuje se perioda sinusových kmitů. Při dosažení kritické rychlosti nastává rezonance těchto kmitů s vlastním kmitáním vozidla. Zvýšené kmitání vozidla má za následek nárůst dynamických účinků na kolej a při nedostatečném odpružení vozových skříní staršího typu způsobuje nepohodlí pasažérů uvnitř vozu. V případech, kdy už dvojkolí není schopné dostředění vlivem kuželovitosti jízdního obrysu, začne narážet okolky na pojížděnou plochu kolejnice. V důsledku toho se náhle změní směr jízdy dvojkolí směrem k druhé kolejnici. Tento pohyb se cyklicky opakuje a vede k extrémnímu namáhání kolejového roštu příčnými silami. Pro tento případ je používán odborný termín cik-cak pohyb.

Při jízdě obloukem nabíhá kolo s okolkem na kolejnici pod úhlem náběhu α . Stýká se přitom s hlavou kolejnice nejčastěji ve dvou místech. První nosný bod leží na temeni, přenáší se zde svislé zatížení od projíždějící soupravy do kolejového roštu. Druhé místo je představené tomuto bodu na vzdálenost Δ . Dochází zde k přenosu příčného zatížení z okolku na bok kolejnicového pásu, o který se okolek opírá. Úhel náběhu má být z hlediska bezpečnosti a plynulosti jízdy co nejmenší.



Obr. 1 Úhel náběhu α ; předstih Δ druhého nosného bodu; zdroj: [31]

Skutečná poloha kolejového vozidla v oblouku je výsledkem všech sil, které na danou soupravu působí. Těchto sil je velké množství a jejich vzájemné působení má ve své podstatě stochastický charakter. Příčný profil železničního dvojkolí je konstruován se zaoblením tvořícím přechod mezi oběžnou plochou dvojkolí a vnitřní stranou okolku. Zaoblení je provedeno pomocí kruhového oblouku s poloměrem křivosti stejným nebo o něco málo větším než zaoblení na kraji hlavy kolejnicového pásu. Z pohledu roviny příčného řezu může při průjezdu obloukem dojít k dotyku kola a kolejnice v jednom nebo ve dvou bodech. Je-li poloměr zaoblení okolku větší než zaoblení hlavy kolejnice, nastává dotyk v jednom bodě. Vedoucí kolo se při postupu zároveň zvedá, až sklon zaoblení v místě dotyku dosáhne takové velikosti, že sklouzne a nastává ráz. Kolový tlak je přitom přenášen z oběžné plochy do místa zaoblení, kde tak vznikají velké specifické tlaky. Je-li poloměr zaoblení okolku menší než zaoblení kolejnice v přechodu z temene

do boku, nastává dotyk ve dvou bodech. Takto vyvolané tlaky na temeno kolejnicového pásu pak vycházejí méně výrazné. K dotyku ve dvou bodech dochází nejčastěji v případě neopotřeбенých kol a kolejnic, zatímco s dotykem v bodě jednom se nejpravděpodobněji setkáme u kolejnic ve vnějším pásu. Ke snížení účinků odstředivé síly má být v koleji ve směrovém oblouku projektováno převýšení koleje. Toho se dosáhne nadvýšením polohy vnějšího kolejnicového pásu vůči pásu vnitřnímu. Vnitřní kolejnicový pás tak nadále zůstává v úrovni nivelety temene kolejnicového pásu (vyjma vzestupnice s bodem obratu). V závislosti na projektovaném převýšení koleje a na jízdní rychlosti projíždějí vozidla obloukem buď s nedostatkem, nebo s přebytkem převýšení. Při jízdě s nedostatkem převýšení dochází ke zvětšení zatížení vnějšího kolejnicového pásu nárůstem vodící a svislé kolové síly. Při jízdě s přebytkem převýšení je možné sledovat zvětšení zatížení vnitřního kolejnicového pásu a to především nárůstem svislé kolové síly.

Každý dynamický účinek vyvolaný průjezdem vlakové soupravy se elasticky-lineárním prostředím konstrukce železničního svršku šíří jako postupná vlna vzniklá superpozicí množiny sinusových vln. Každý pohyb elementu lze popsat pohybovými rovnicemi, které mají v kartézské – pravoúhlé – soustavě souřadnic tvar [32]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= c_1^2 \frac{\partial \Delta}{\partial x} - 2c_2^2 \left(\frac{\partial \omega_z}{\partial y} - \frac{\partial \omega_y}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= c_1^2 \frac{\partial \Delta}{\partial y} - 2c_2^2 \left(\frac{\partial \omega_x}{\partial z} - \frac{\partial \omega_z}{\partial x} \right), \\ \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= c_1^2 \frac{\partial \Delta}{\partial z} - 2c_2^2 \left(\frac{\partial \omega_y}{\partial x} - \frac{\partial \omega_x}{\partial y} \right)\end{aligned}\quad (1)$$

kde u, v, w jsou složky vektoru posuvu s , Δ je kubická dilatace a $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ jsou složky rotace.

Vnitřní strukturou materiálu konstrukce železničního svršku se vlivem dynamických účinků na styku kolo – kolejnice přenášejí přes kolejový rošt do pražcového podloží rovinné vlny, u kterých rozlišujeme dva základní typy:

- příčná (ekvivolumetrická) vlna;
- podélná (dilatační, nerotační) vlna.

Vektor posuvu s příčné vlny stojí kolmo k vlnové normále a její rychlost šíření c_2 je vyjádřena vztahem:

$$c = c_2 = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \text{ dvojnásobný kořen.} \quad (2)$$

Vektor posuvu s vlny dilatační se svým směrem shoduje se směrem vlnové normály. Rychlost šíření podélné vlny c_1 lze definovat rovnicí:

$$c = c_1 = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}}, \quad (3)$$

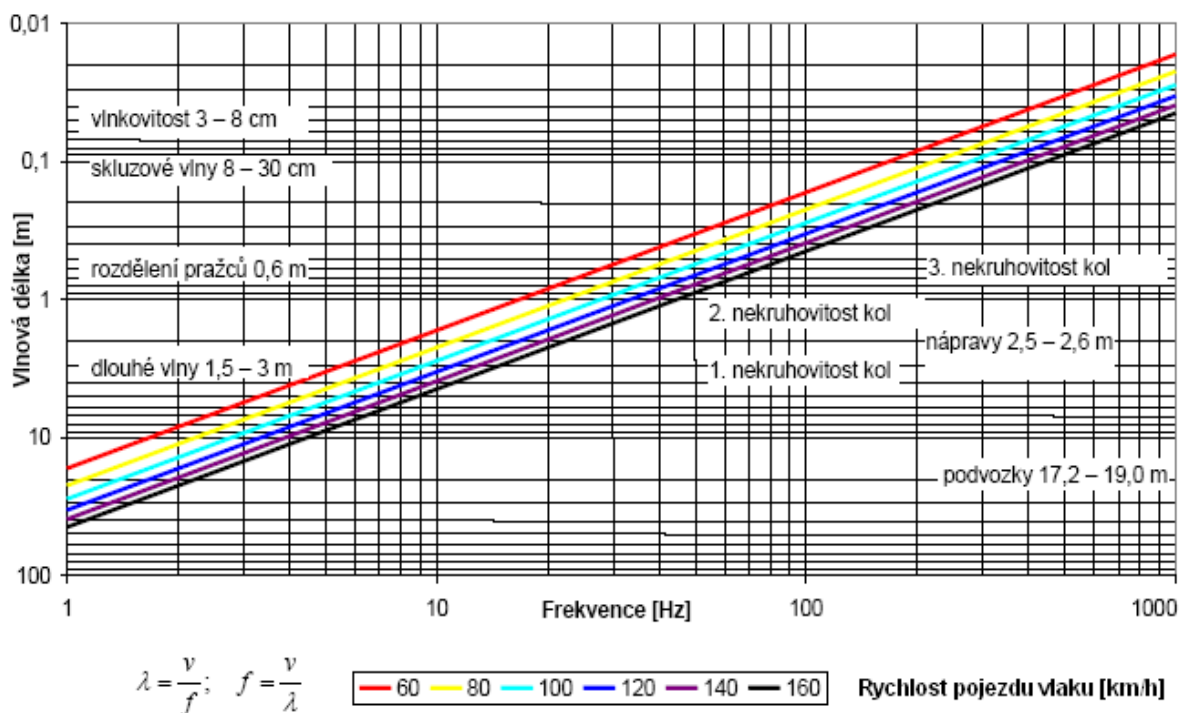
Tyto zmiňované rychlosti vlnění nejsou vzhledem k relativní izotropii materiálu závislé na směru postupu vlny. Ve skutečnosti však bude rychlost šíření podélné vlny c_0 kolejnicovým upevněním o něco menší. Je to dáno větší tuhostí neomezeného prostředí, z něhož jsou výše uvedené vztahy odvozeny, oproti skutečné struktuře železniční tratě.

Povrchovými strukturami prvků železničního svršku se účinky od dynamického namáhání tratě přenášejí v podobě Rayleighových vln. Amplituda Rayleighových vln klesá exponenciálně s hloubkou pod povrchem. Tyto vlny vyvolávají ve struktuře materiálu rovinné přetvoření. Jejich amplituda leží v rovině dané směrem postupu vlny a normálou k povrchu upevnění. Posuvy elementů kolmé k této rovině amplitud jsou nulové. Rychlost Rayleighových vln je nezávislá na vlnové délce. Poměr rychlostí c_R / c_2 je funkcí pouze Poissonova čísla μ :

$$\left(\frac{c_R^2}{c_2^2}\right)^3 - 8\left(\frac{c_R^2}{c_2^2}\right)^2 + \frac{8(2-\mu)}{1-\mu}\left(\frac{c_R^2}{c_2^2}\right) - \left(\frac{8}{1-\mu}\right) = 0. \quad (4)$$

Rayleighovy vlny lze interpretovat jako pohyb myšleného bodu po elipse, která se pohybuje stálou rychlostí c_R rovnoběžně s povrchem. Poměr poloos této elipsy se mění s hloubkou z pod povrchem. Tím se mění také smysl oběhu myšleného bodu. Vodorovné posuvy elementů velmi rychle klesají s rostoucí hloubkou pod povrchem – Rayleighovy vlny tak mají charakter povrchových vln. Vlny vysokých frekvencí – malých vlnových délek – ztrácejí amplitudy posuvů rychleji v závislosti na hloubce z , z čehož plyne, že u takovýchto vln se energie jimi nesená transportuje v tenké zóně u povrchu jednotlivých komponentů železničního svršku – skin efekt.

Z hlediska vlnových délek a frekvencí je obecně přijímána hypotéza dle [33], viz obr. 2.



Obr. 2 Zdroje vibrací z hlediska vlnové délky a frekvence; zdroj: [33]

Dle teorie akustiky lze nahlížet na hnací jednotku v klidu či pohybu jako na bodový zdroj hluku. Ve speciálních případech (pomalá jízda soupravy, lokomotivní vlak, sestava vozů s plochými koly atd.) lze vnímat pohybující se vozidlo jako řadu bodových zdrojů. Nejčastěji se však vlak bude chovat jako přímkový zdroj omezené délky vyzařující do svého okolí akustické vlny. Tyto vlny mají tvar souosých válců. Hluk způsobený železniční dopravou lze obecně rozdělit do čtyř skupin na hluk hnacího vozidla, hluk vznikající na styku kolo – kolejnice (hluk valivý, kvílivý a impaktní), aerodynamický hluk a hluk na styku trakčního sběrače s trolejovým vedením a konečně na ostatní lokální hluky vznikající v důsledku provozování kolejové dopravy (hluk z brzdění a kolejových brzd, hluk z akustických informačních a orientačních systémů, hluk zabezpečovacího zařízení apod.) [34].

Hlukové emise jsou ovlivňovány celou řadou faktorů, především pak způsobem vedení trasy, druhem trakce, rychlostí vlaků, konstrukcí a technickým stavem železničního svršku a vozidel a intenzitou provozu. Dále je pak šíření hluku závislé na klimatických podmínkách, konfiguraci okolního terénu a druhu jeho povrchu. Významným faktorem určujícím převažující typ hluku je především rychlost.

Schopnost tlumit dynamické účinky projíždějící vlakové soupravy zastává na kolejovém roštu především systém pružného kolejnicového upevnění, resp. pryžová podložka umístěná pod patu kolejnice, příp. i penefolová nebo polyetylenová umístěná pod podkladnicí. Zásadní charakteristikou těchto pryžových podložek je bezesporu jejich statická a dynamická tuhost. Statická tuhost upevnění (pérová konstanta) je přímo definovaná jako poměr mezi zatížením a poklesem kolejnice vůči podkladu, přičemž obě proměnné jsou funkcí času.

Je ovšem známo, že celý systém od železničního svršku až po podloží vykazuje nelineární chování a významný vliv na správné stanovení tuhosti má rovněž kontakt mezi pražcem a kolejovým ložem. V těchto případech je určení statické tuhosti výrazně složitější a do popředí zájmu se tak dostává dynamická tuhost, na jejímž základě lze určit, jak mechanický systém deformačně reaguje na časově proměnný průběh vstupujícího silového působení. Postupy pro praktické zjišťování a hodnocení tuhosti upevnění kolejnic jsou uvedeny v Obecných technických podmínkách Českých drah pro upevnění kolejnic, resp. pro jeho dílčí prvky (pružné svěrky a spony, pružné podložky) a v normě ČSN EN 13146-9+A1.

3 METODIKA MĚŘENÍ

Jednotná metodika měření je pro vývoj a analýzu železničních konstrukcí naprosto klíčová. Umožňuje získávat data v unifikovaném formátu, nezávisle na zhotoviteli měření. Na základě těchto dat je pak možné provádět analýzu různých typů konstrukcí, ověřovat vliv jejich případných modifikací, sledovat trendy chování v průběhu času, apod. Bez standardizované metodiky není možné získaná data uspokojivým způsobem svázat a vyhodnotit s výsledky jiných měření.

3.1 LABORATORNÍ MĚŘENÍ

Aby bylo možno interpretovat neznámé chování mechanické soustavy představující zatíženou železniční trať, je zapotřebí v rámci měření vybudit tuto soustavu také známými budicími účinky. Vhodným budicím prostředkem je v těchto případech mechanický ráz vyvolaný speciálním rázovým kladivem, příp. jiným typem řízeného budiče. Rázy mohou libovolnou mechanickou soustavu vybudit do rezonančních kmitů díky tomu, že spektrum rázu je spojitě a obsahuje složky všech důležitých kmitočtů. Cílem zkoušek prováděných pomocí modálního kladiva v jednotlivých měřicích kampaních (tzv. impact testing) je zjištění modálních parametrů kolejového roštu v oblasti upevnění kolejnic. Těmito parametry jsou vlastní frekvence, vlastní tvary kmitů a modální tlumení. Při zkoumání dynamických účinků buzené mechanické soustavy metodou experimentální modální analýzy je nezbytné předpokládat technickou linearitu vyšetřovaného systému, tzn., že odezva systému je pokud možno přímo úměrná odpovídajícímu buzení. I když v praxi nikdy nepracujeme se systémy čistě lineárními, při provádění modální analýzy uvažujeme nejlepší možnou lineární aproximaci systémové odezvy. Laboratorní práce byly vzhledem k výše vytyčeným cílům zaměřeny čistě na vibrodiagnostiku, tedy měření veličin prostřednictvím snímačů zrychlení vibrací.

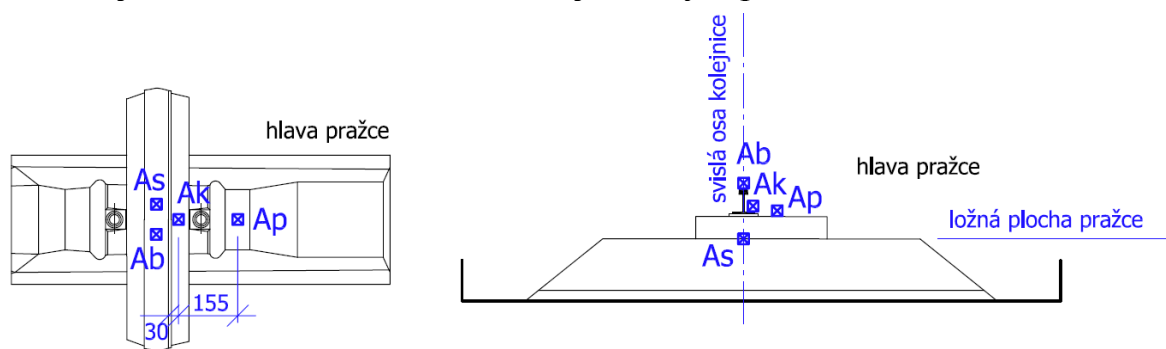
Jako zkušební vzorek byla použita část pražce s uzlem upevnění. Pražec byl uložen do šterkového lože tvaru komolého jehlanu, které bylo zřízeno ve zkušební vaně o rozměrech 2,0 x 2,0 m. Zkušební vana byla od základové desky odizolována mezivrstvou z korku. Laboratorní zkoušky byly prováděny v laboratoři ÚŽKS a od roku 2015 ve venkovním areálu Fakulty stavební VUT v Brně.

Laboratorní vzorky kolejového roštu byly osazeny snímači dle obr. 3. Z pohledu příčného řezu byla všechna čidla umístěna do podélné osy pražce. Umístění snímačů A_k a A_p vzhledem ke stojině kolejnice bylo voleno koncepčně v souladu s metodikou měření in situ popsanou v kapitole 3.2. Vzhledem k umístění čidla A_s do šterku pod ložnou plochu pražce byl na ÚŽKS vyvinutý speciální měřicí kámen.

Ráz byl buzen kladivem Brüel & Kjær, typ 8210 Impact Hammer, s budicím hrotem Hard tip black. Pro řízené buzení v laboratoři ÚŽKS byl navíc pro srovnání použit elektrodynamický budič TIRA TV 51165-IN. Shaker S 517-IN byl umístěn přímo na hlavu kolejnice, a sice prostřednictvím speciálně upravené roznášecí desky. Aparatura budiče TIRA se dále sestávala ze zesilovače Amplifier BAA 1000, dmýchadla SB0140 a čtyř-kanálového řídicího systému VibrationVIEW. Data z obou metodik měření byla zpracovaná pomocí modulárního analyzátoru PULSE 3560D od společnosti Brüel & Kjær. Uspořádání měření je patrné z obr. 4.

Na každém vzorku testovaného upevnění byla provedena série čtyř měření po deseti úderech kladiva, z nichž vždy první měření sloužilo pouze k ustálení pozice testovaného vzorku a nebylo vyhodnoceno. Pro vybrané vrtulové typy upevnění pak byl stejným postupem ověřen ještě nedotažený, resp. přetažený stav v rozpětí 50 MN od předpisové hodnoty. Při měření s elektrodynamickým budičem byla nastavena hodnota generovaného zrychlení na $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Jedná se o maximální zrychlení, které umožňovalo stabilní řízení budiče. Každý vzorek byl takto vybuzen

dvakrát. Zkouška vlivu dotažení vrtule tímto způsobem buzení prováděna nebyla. Frekvenční rozsah obou typů měření byl po prvních několika zkušebních pokusech s rázovým kladivem zvolen $0 \div 1000$ Hz. Frekvence vyšší než 1,0 kHz jsou zajímavé zejména z akustického hlediska, jež nebylo předmětem laboratorních testů.



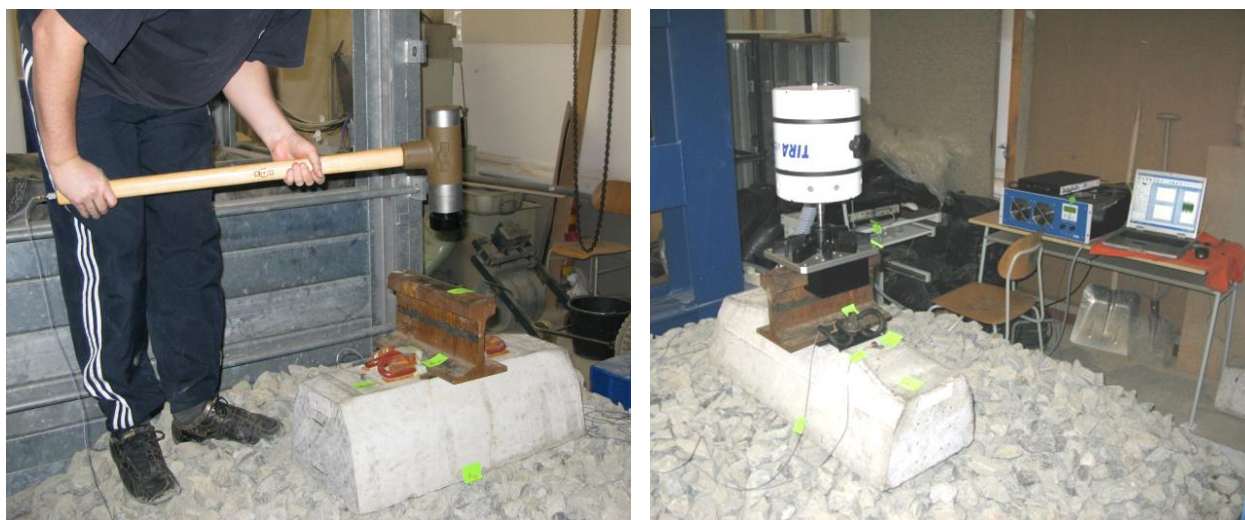
Ab ... snímač na budiči (v případě eldyn. vibrátoru bude akcelerometr umístěn na roznášecí desce)

Ak ... snímač na patě kolejnice

Ap ... snímač na hlavě pražce

As ... měřicí kámen na ložné ploše pražce

Obr. 3 Schéma uspořádání měření; zdroj: autor



Obr. 4 Schéma uspořádání měření, vlevo buzení rázem, vpravo buzení elektrodynamickým budičem; zdroj: autor

3.2 MĚŘENÍ IN SITU

Navržená metodika měření má sloužit pro porovnávání jednotlivých konstrukcí upevnění kolejnic, má pomoci odhalit jejich slabá místa a predikovat vliv na provozovanou kolej z dlouhodobého hlediska. Metodika je sestavena ze třech na sobě nezávislých modulů – měření pohybů, vibrodiagnostice a měření hluku. Jednotlivé oblasti jsou v reálném prostředí železniční trati spolu úzce spjaty a navzájem se doplňují. Přesto je možné využívat jednotlivé moduly odděleně.

Důležitou měřenou veličinou k určování stability konstrukce železničního svršku je časový průběh výchylky kmitání, tedy dráha reprezentující zdvihy a poklesy. Dle

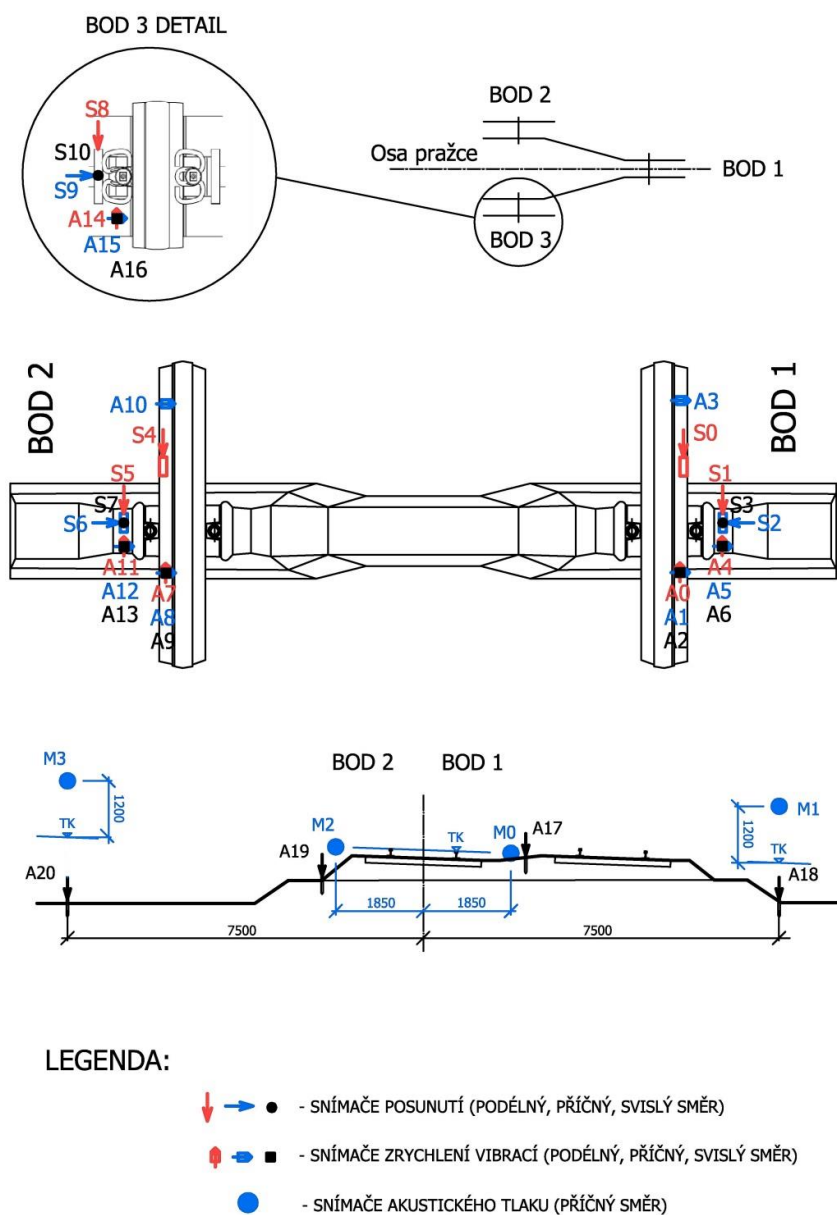
výchyly kmitání je možné odhalit některé dynamické jevy v nízkofrekvenční oblasti, které pouze na základě vibrodiagnostiky nemusejí být tolik patrné. Jmenovitě se jedná např. o průhyby příčných pražců po délce pražce nebo průhyby kolejového roštu podél osy koleje. Tyto jevy mají úzkou souvislost nejen s typem dynamického namáhání, ale také s možným nerovnoměrným podepřením pražců, apod. Kolejový rošt byl osazen sestavou snímačů dráhy, které měří relativní posuny vůči pláni tělesa železničního spodku. Metodika byla navržena tak, aby umožňovala dosažení přijatelných výsledků ve smyslu velikosti výsledných relativních posunů vzhledem k těm předpokládaným absolutním. Pro osazení použitých snímačů dráhy je zapotřebí řada přípravků, které dokáží snímače pevně udržet v definované poloze při průjezdu vlakové soupravy. Pro tento účel byl na ÚŽKS vyvinut speciální fixační systém, který byl v rámci juniorského projektu specifického výzkumu číslo 891/2010 „Komplexní monitoring a analýza dynamicko-akustických jevů v koleji“ registrován jako funkční vzorek. V daném projektu jsem byl vedoucím řešitelem.

Dynamické účinky na konstrukce nejlépe vystihuje časový průběh zrychlení, příp. rychlosti kmitání. Z toho důvodu byla jako stěžejní součást metodiky měření in situ navržena vibrodiagnostika uzlu upevnění prostřednictvím akcelerometrů. V rámci srovnání laboratorních výsledků s výsledky získanými v terénu byl kolejový rošt buzen rázovým kladivem obdobně, jako tomu bylo v případě měření v laboratoři popsaném v kapitole 3.1. Jelikož však měření probíhalo v provozované koleji, nebyl do kolejového lože umístěn snímač As. Jeho vložení by totiž vyžadovalo odhrnutí šterku z oblasti sledované hlavy pražce, umístění měřicího kamene pod ložnou plochu pražce, opětovné zasypání šterkem a zhutnění porušené oblasti. Celý postup by se pak navíc opakoval při vyndávání kamene z kolejového lože. Tyto úkony by měly negativní dopad na bezpečnost jak účastníků měření, tak i provozování drážní dopravy, což je v rozporu se vstupními požadavky kladenými na vytvářenou metodiku měření. Pro srovnání terénních výsledků s laboratorními jsou čidla na pražci, resp. na kolejnici dostačující.

Přestože negativní účinky hluku z železnice zaujímají v odvětví dopravy marginální postavení, důležitou součástí diagnostiky vlastností kolejové jízdní dráhy je bezesporu měření akustických emisí trati. Daná problematika nabývá na aktuálnosti i díky rozšiřujícím se systémům příměstské železniční dopravy vedené v hustě osídlených oblastech napříč celou Českou republikou.

V běžné koleji se vlivem provozu nepředpokládají problémy deformačního charakteru, jak tomu může být například v srdcovkových částech výhybek a kolejových křižovatek. Úlohy týkající se napjatosti a držebnosti upevnění či únavy materiálu jsou dostatečně pokryty zkouškami v rámci normové řady ČSN EN 13481 a to včetně provozního ověřování. Silové účinky běžného provozu se očekávají u testovaných konstrukcí vždy srovnatelné, což má být zajištěno výběrem vhodného stanoviště měření. Z těchto důvodů nebyla v rámci metodiky měření in situ navržena část týkající se analýzy silového působení a napětí v konstrukci.

Na obr. 5 jsou uvedeny všechny možné kombinace snímačů, které při měření in situ však nikdy nebyly použity pohromadě. Konkrétní sestavy čidel jsou uvedeny u jednotlivých případových studií v textu dizertační práce.



Obr. 5 Schéma uspořádání měření; zdroj: autor

Snímače byly pomocí kabeláže zapojeny do integrované měřicí PC sestavy DEWETRON. Hardware PC sestavy umožňuje současné měření zrychlení vibrací na 16 kanálech, dále pak obsahuje 16 napěťových portů a 12 vstupů pro zapojení indukčnostních snímačů. Systém rovněž umožňuje vytvoření virtuálních kanálů s filtrací a integrací pro vzájemný převod zrychlení na rychlost anebo výchylku kmitání. Kapacitu měření je možné dále navýšit přidáním dalších měřicích modulů ovládaných z přenosného počítače. Záznamy byly ukládány na pevném disku ústředny.

Vzhledem k předpokládaným vyhodnocovacím metodám byla zvolena vzorkovací frekvence 30,0 kHz. Z hlediska dynamických parametrů jsou pro nás zásadní frekvence do 1,0 kHz. Frekvence vyšší než 1,0 kHz již nemají na dynamické chování konstrukce velký vliv. Proto byla pro všechny snímače zrychlení vibrací nastavena hodnota dolní propusti právě 1,0 kHz. Horní propust má za úkol odstranit rušivé prvky při nízkých frekvencích, jakým je např. triboelektrický šum. Tento šum vzniká mezi kabelem a izolátorem kabelu za vzniku povrchového náboje. Z toho důvodu byla na snímačích umístěných v kolejovém roštu a u mikrofonů zvolena horní propust 3,4 Hz. U snímačů na pláni tělesa železničního spodku a v zemním tělese lze předpokládat výrazné nízkofrekvenční složky, proto byla horní propust u těchto snímačů snížena na 1,0 Hz. Všechna čidla a měřicí cesty byly před každým měřením kalibrovány.

4 MATEMATICKÝ APARÁT

4.1 ANALÝZA V ČASOVÉ OBLASTI

Amplitudy mechanického chvění, určující přímo jeho nebezpečnost a škodlivost, je možno kvantitativně hodnotit několika způsoby. Efektivní hodnota RMS je z hlediska hodnocení nejdůležitější, protože odráží časový průběh amplitud chvění a zároveň má přímý vztah k jeho energetickému obsahu. Je tedy měřítkem nebezpečnosti a škodlivosti dané veličiny. Efektivní hodnotu zrychlení kmitání a_{ef} [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$] lze popsat následovně:

$$a_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) \cdot dt}, \quad (5)$$

kde $a(t)$ [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$] je okamžitá hodnota zrychlení kmitání a T [s] je doba, pro kterou je efektivní hodnota RMS určena.

Ekvivalentní trvalá vážená hladina akustického tlaku $L_{pAeq,T}$ [dB(A)] je taková vážená hodnota hladiny akustického tlaku A spojitého stálého zvuku, která ve specifikovaném časovém intervalu T má tutéž hodnotu druhé mocniny akustického tlaku jako posuzovaný zvuk, jehož hladina se v čase mění. Tato hladina je dána vztahem [19, 35]:

$$L_{pAeq,T} = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right], \quad (6)$$

kde T [s] je časový interval měření, po který probíhá výpočet, $p_A(t)$ [Pa] je okamžitý vážený akustický tlak A a p_0 [Pa] je referenční hodnota akustického tlaku podle ČSN ISO 1996-1.

Hladina expozice průjezdu TEL je vážená hladina expozice hluku A průjezdu vlaku, měřená v časovém intervalu T a normalizovaná na dobu průjezdu T_p . Časový interval T je tak dlouhý, aby mohl zahrnout veškerou akustickou energii dané

události v bodech alespoň do 10 dB pod nižší hodnotou L_{pA} během časového intervalu T . TEL je dána následujícím vztahem [19, 35]:

$$TEL = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{T_p} \int_0^T \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right], \quad (7)$$

kde T_p [s] je doba průjezdu vlaku, což odpovídá celkové délce vlaku [m] dělené jeho jízdní rychlostí V [$m \cdot s^{-1}$], T [s] je časový interval měření, $p_A(t)$ [Pa] je okamžitý vážený akustický tlak A a p_0 [Pa] je referenční hodnota akustického tlaku podle ČSN ISO 1996-1.

4.2 ANALÝZA VE FREKVENČNÍ OBLASTI

Nejčastěji užívanou metodou pro převod z časové do frekvenční oblasti je Fourierova transformace. Jedná se o klasickou neparametrickou metodu spektrální analýzy. Celá analýza se tedy opírá pouze o změřená data. Nejsou vytvářeny žádné modely vzniku a predikce signálu. Fourierova transformace je pro diskrétní funkci definována následujícími rovnicemi:

$$\text{Přímá transformace: } X_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{-j(\frac{2\pi kn}{N})}; \quad (8)$$

$$\text{Zpětná transformace: } x_n = \sum_{k=0}^{N-1} X_k \cdot e^{j(\frac{2\pi kn}{N})}, \quad (9)$$

kde x_n je hodnota n -tého prvku diskrétní posloupnosti (čas $t = n \cdot \Delta$), X_k je k -tá frekvenční složka signálu, $\Delta = T / N$, T [s] je doba trvání realizace, N je počet prvků naměřené posloupnosti a j je imaginární jednotka. Posloupnost hodnot X_k můžeme nazvat Fourierovými koeficienty. Jedná se o komplexní čísla, která nám dávají úplný obraz o frekvenčním složení signálu.

Třetinooktávové pásmo představuje frekvenční pásmo, kde střední frekvence $f_{c,i+1}$ [Hz] je určena z pásma $2^{1/3}$ násobné šířky, než je šířka pásma, z něž byla určena střední frekvence f_{ci} [Hz]. Pro šířku frekvenčního pásma tedy platí:

$$f_{c,i+1} = 2^{\frac{1}{3}} \cdot f_{c,i}. \quad (10)$$

Velikost střední frekvence f_c [Hz] se vypočte energetickým sečtením frekvencí, jež spadají do daného frekvenčního pásma podle vztahu:

$$f_c = \sqrt{f_d \cdot f_h}, \quad (11)$$

kde f_d [Hz] a f_h [Hz] jsou hraničními frekvencemi příslušného pásma.

Specifickým případem přenosové funkce je frekvenční odezvová funkce FRF. Jedná se o funkci získanou řezem přenosovou funkcí v komplexní Laplaceově oblasti. Tento řez je rovnoběžný s imaginární osou oblasti. FRF je možné vyjádřit poměrem výstupu ke vstupu, pohybem vůči síle, resp. odezvou na příslušné buzení. Odezvové parametry FRF mohou být vyjádřeny formou výchylky, rychlosti nebo zrychlení. FRF vyjadřující poměr výchylky vůči síle se nazývá funkcí receptance

(dynamické poddajnosti), která je základní funkcí výpočtové modální analýzy. Inverzí této funkce vyjádříme strukturální dynamickou tuhost. Při aplikaci experimentální modální analýzy, kdy se pro měření odezvy systému nejčastěji používají akcelerometrické snímače, je praktičtější využití funkce akcelerační, tedy vzájemného vztahu mezi zrychlením a budicí silou. Inverzí funkce akcelerační získáme vztah pro zdánlivou hmotnost zkoumaného systému.

4.3 ANALÝZA V ČASOVĚ-FREKVENČNÍ OBLASTI

Typickým příkladem časově-frekvenční transformace je krátkodobá (okénková) Fourierova transformace STFT. STFT lokalizuje frekvenční složky v čase s konstantním rozlišením. Jedná se tedy o lineární transformaci. Základním principem je rozdělení signálu na dostatečně malé realizace, u nichž je možno předpokládat dostatečnou stacionaritu (ergodicitu). To je provedeno multiplikací jisté okénkové funkce a signálu. Na každém takovém výřezu je provedena Fourierova transformace. Okénko se posouvá v čase. Definiční tvar STFT počítané z diskrétní posloupnosti je:

$$STFT(m, k) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot g[n-m]^* \cdot e^{-j \frac{2\pi kn}{N}}, \quad (12)$$

kde $x[n]$ je datová posloupnost analyzovaného signálu, g okénková funkce, m posunutí okna, $*$ komplexní konjugace, k frekvenční složka a N celkový počet vzorků signálu. Časově-frekvenční zobrazení STFT má určité omezení. Výsledné rozlišení v čase je limitováno tzv. Heisenbergovým principem neurčitosti, který lze znázornit pomocí tzv. Heisenbergových elips, a který je definován rovnicí:

$$\Delta t \cdot \Delta f = konst. \quad (13)$$

Rozlišení v časové i frekvenční oblasti nemůže být nekonečně malé, lze je vyjádřit výše uvedeným principem neurčitosti. Vztah (13) silně závisí na volbě časové okénkové funkce g . Složka signálu nemůže být prezentována jako bod v časově-frekvenčním prostoru. Je možné určit pouze její pozici uvnitř obdélníka $\Delta t \cdot \Delta f$ v dané časově-frekvenční oblasti.

5 VÝBĚR VHODNÉHO STANOVIŠTĚ MĚŘENÍ

Pro výběr vhodného úseku měření jsem navrhnul čtyřstupňový postup uvedený v kapitole 1.2, kdy posledním krokem výběru je stanovení konkrétního měřicího profilu. Určit ve vybraném měřicím úseku konkrétní pražec či jinou analogickou konstrukci není jednoduché. Tuzemské i zahraniční experimentální práce poukazují na skutečnost, že zejména příčné betonové pražce mají individuální podmínky podepření v kolejovém loži, které se liší prakticky kus od kusu [26].

Za jednu z nejdůležitějších vlastností při posouzení stavu železniční tratě je považována její svislá tuhost. Tuhost je důležitým parametrem při návrhu železničního tělesa a poskytuje základní informaci pro posouzení rozsahu údržby stávajících tratí. Celý systém trati vykazuje silně nelineární chování. Nedostačující tuhost trati vede k jejím deformacím, což má za následek nárůst napětí

v kolejnicových pásech a s tím související jevy (ztráta drážebnosti upevnění apod.). Naopak příliš vysoká tuhost způsobuje nadměrné dynamické namáhání konstrukce trati a zvyšuje tak její opotřebení.

Významný vliv na správné stanovení tuhosti má kontakt mezi pražcem a kolejovým ložem. Z toho důvodu je velmi důležitý odhad kvality podepření pražců vybraného úseku měření. Pro konkrétní měřicí profil je pak zpravidla vybrán pražec vykazující kvalitativně nejvhodnější vlastnosti. Pro tento účel byl již dříve na ÚŽKS vyvinutý speciální měřicí rám, viz obr. 6. Rám se volně položí na vybrané místo v kolejovém roštu, rovnoběžně s osou koleje v přímé, příp. tangenciálně ke směrovému oblouku. K rámu jsou prostřednictvím speciálních objímek uchyceny indukčnostní snímače. Parametry rámu umožňují současné měření svislých posunů vyvolaných účinky kolejových vozidel až na šesti pražcích za sebou. Rám je díky svojí hmotnosti a způsob podepření vhodný pro měření do rychlosti $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Při vyšších rychlostech již nelze zajistit spolehlivé výsledky vlivem působení aerodynamických účinků vozidel. Z měřených pražců je pak vhodné vybrat ten s nejmenšími posuny. Přitom je však nutné na základě časového průběhu zatlačení zohlednit také další okolnosti, jako např. bilineární průběh, výrazné zdvihové vlny nebo tvar zatlačení v oblasti lokálních extrémů.

Alternativou k výše uvedenému postupu je individuální osazení indukčnostních snímačů pomocí magnetických stojánek a rámu tvořeného ocelovým nosníkem s tyčemi. Výhodou tohoto řešení je možnost umístit čidla na větší vzdálenosti a do vybraných míst. Lze tak sledovat vlastnosti celého vybraného úseku pro měření. Je tím současně minimalizováno riziko, že žádný ze sledovaných pražců nevyhoví kritériím přijetí, kvůli vzájemnému spolupůsobení sousedních pražců. Hlavní nevýhoda pak spočívá ve vyšších časových požadavcích na osazení snímačů a v limitování z hlediska délky jejich kabeláže. Tento systém je úspěšně odzkoušen pro traťové rychlosti až $160 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.



Obr. 6 Měřicí rám pro sledování poklesů pražců pod zatížením; zdroj: ÚŽKS

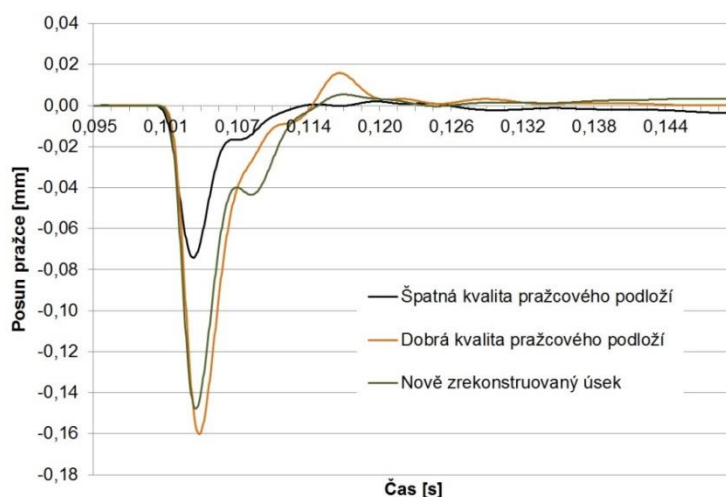
Další alternativou je nepřímá metoda výpočtu zatlačení pražce z jiné měřené veličiny. V rámci počátečních pokusů byly sledovány záznamy různých typů

snímačů zrychlení a rychlosti vibrací a z nich prostřednictvím jednoduché či dvojité numerické integrace počítány průběhy zatlačení. Počáteční impuls byl vybuzen úderem rázového kladiva do hlavy pražce. Signály byly zpracovány v programech FlexPro 7.0 a Microsoft Excel 2010. Měření prokázalo vyhovující vlastnosti piezoelektrického akcelerometru, který byl tak zvolen také pro další aplikace v terénu. Algoritmus výpočtu byl po mnoha pokusech a nastaveních včetně kontroly opakovatelnosti určen následovně: průměrování hodnot z jednotlivých rázů kladiva, zobrazení časového průběhu měřených veličin, vhodný časový výřez, aproximace digitálních signálů vhodnou matematickou křivkou, filtrace pásmovou propustí, numerická integrace filtrovaného signálu, výpočet přenosové funkce.

Dalším stádiem bylo nalezení vhodných měřicích úseků pro zkoušku in situ. Základním předpokladem pro výběr byla dobrá znalost daného místa (popis geometrie koleje, výsledky měření GPK, apod.). Hledané úseky koleje musely svými parametry odpovídat parametrům rekonstruované trati, trati provozované v dobrém stavu i trati ve špatném technickém stavu. Bylo to za účelem nalezení závislosti mezi výsledky měření a kvalitou pražcového podloží. Daná místa navíc měla mít srovnatelné vlastnosti podloží. Optimálně se proto měla nacházet blízko sebe.

Obr. 7 znázorňuje časové průběhy vypočítaných zatlačení pražce srovnávaných úseků koleje. V koleji se špatnou kvalitou pražcového podloží jsou vyvozeny výrazně menší posuny pražce, než je tomu ve zbylých dvou úsecích. Při úderu kladiva zde dochází ke zpružnění kolejového roštu, který vlivem špatného podloží neklade takový odpor, jako je tomu v ostatních dvou případech. V soustavě tak nelze vybudit odpovídající ráz, čímž na pražec působí menší budicí síla. Bez znalosti této síly by tak z uvedeného grafu bylo možné mylně interpretovat, že úsek se špatnou kvalitou pražcového podloží vykazuje ze všech měřených míst nejoptimálnější vlastnosti. Z toho důvodu je nutné průběhy vypočtených zatlačení normovat známou budicí silou. Normování bylo provedeno výpočtem přenosové funkce receptance. V grafech receptance již dominuje právě úsek se špatnou kvalitou pražcového podloží. Lokální maxima receptance nám určují, při jakých frekvencích je možné s přispěním minimálního silového účinku vybudit velké poklesy pražce. Převrácenou hodnotou receptance je pak možné získat frekvenční průběh dynamické rázové tuhosti.

Statistickým vyhodnocením dat ze všech uskutečněných měření lze za vyhovující považovat pražce, u kterých je efektivní hodnota dynamické rázové tuhosti min. $250 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$. Tato efektivní hodnota je přitom počítána do frekvence 1000 Hz s ohledem na pracovní rozsah použitého rázového kladiva. Mez pro přijetí je platná jak pro betonové, tak i pro testované ocelové pražce tvaru Y. V případě ocelových pražců vycházejí hodnoty dynamických rázových tuhostí obecně nižší, než je tomu u pražců betonových.



Obr. 7 Vypočítané svislé posuny pražce srovnávaných úseků koleje; zdroj: autor

6 REALIZACE A VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

Měření probíhala jednak v laboratorních podmínkách a jednak in situ. V laboratoři byla testována upevnění kolejnic FC I, W 14, W 14NT, W 21NT a E 14, ve venkovním areálu Fakulty stavební VUT v Brně upevnění W 28NT a pro srovnání s výsledky z laboratoře též upevnění W 14NT a W 21NT. V terénu byla pomocí rázu ověřována upevnění FC I a W 14 a na základě reálného provozu pak upevnění FC I, W 14, Vossloh 300, S 15 a KS. Měření probíhala ve vybraných lokalitách koridorových tratí u Bílovic nad Svitavou, Napajedel, Hranic na Moravě a Třebovic v Čechách. Dále byla zvolena stanoviště na celostátní dráze u Počátek-Žirovnice, Popelína a Kamenného Malíkova.

Naměřená data z řízeného buzení a buzení rázem byla zpracována pomocí programu ME'Scope, který data z analyzátoru upravil do formy přenosových funkcí nebo v případě buzení elektrodynamickým budičem do funkcí spekter. V programu ME'Scope byly rovněž stanoveny hodnoty poměrného útlumu. Pro vyhodnocení v časové oblasti byl použit přímo software měřicího zařízení. K práci se signály získanými z terénních měření byl použit software měřicí ústředny DeweSoft, program FlexPro 7.0, Microsoft Excel 2010 a program VibroDiagRail, který byl pro tyto účely vyvinut na ÚŽKS VUT v Brně.

Pro jednoznačné určení chování kolejového roštu bylo nezbytné stanovit znaménkovou konvenci jeho posunů. Konvence je pro všechna měření zvolena následujícím způsobem:

- minus (-): pohyb kolejnice nebo pražce podélně proti vlaku, příčně dovnitř oblouku příp. vpravo ve směru staničení v přímé, resp. svisle směrem dolů (pokles);
- plus (+): pohyb kolejnice nebo pražce podélně ve směru vlaku, příčně vně oblouku příp. vlevo ve směru staničení v přímé, resp. svisle směrem nahoru (zdvih).

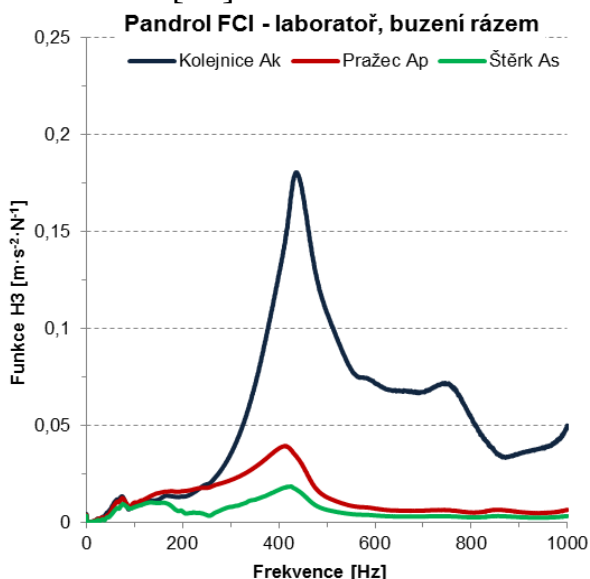
Vyhodnocení vibrací ve frekvenční rovině bylo rozčleněno na nízkofrekvenční oblast $0 \div 80$ Hz, středněfrekvenční oblast $80 \div 400$ Hz a vysokofrekvenční oblast $400 \div 1000$ Hz. Toto rozdělení je založeno na principu, že v oblasti nízkých frekvencí se projevují zejména účinky vyvolané působením podvozků a dvojkolí jedoucích železničních vozidel, pásmo středních frekvencí je projevem imperfekcí na stykové ploše kolo – kolejnice stejně tak, jako vysokofrekvenční oblast do 1000 Hz. Zde se však navíc přidává vliv akustických jevů zapříčiněných pohybem vozidla. Činitelé tlumení soustavy jsou určovány z frekvenčních odezvových funkcí v pásmu $1 \div 1000$ Hz. Třetinooktávová analýza akustického tlaku byla prováděna pro pásma středních frekvencí 16 Hz až 12,5 kHz. Frekvenční amplitudová spektra jsou uváděna do hodnoty 2,0 kHz. Nastavení rozsahu analýzy vychází z předchozích pokusů a cvičných vyhodnocení. Jsou postihnuta nejvýznamnější pásma pro sledování předmětných parametrů se zohledněním negativních účinků hluku na lidský organismus. Pro jednotlivé typy analýz byly stanoveny nejistoty měření v souladu s normou ČSN P ENV 13005 [37].

6.1 LABORATORNÍ MĚŘENÍ

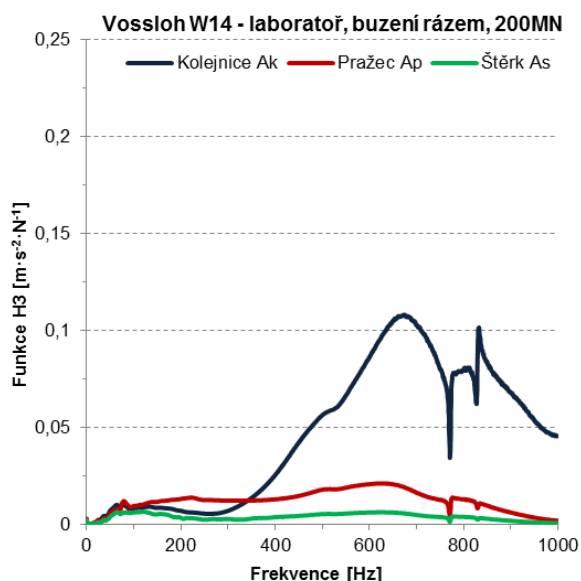
Měřeními v laboratoři lze věrohodně popsat silné a slabé stránky testovaných upevnění. Současně je možné predikovat jejich chování v reálné koleji před samotným zhotovením nebo výměnou železničního svršku. Výsledky měření poskytují rovněž cenné informace pro práci s výpočtovými modely jako např. vlastní frekvence, tvar vlastního kmitu nebo poměrný útlum. Mohou tak při relativně nízkých finančních a časových nákladech odhalit případné problémy a napomoci v optimalizaci konstrukčního řešení uzlu upevnění. Vzhledem k rychlosti, vhodnému nastavení a dobré opakovatelnosti zkoušky je možné vícenásobným měřením získat ve velmi krátkém čase statisticky významné výsledky.

Uskutečněná laboratorní měření prokázala stabilní vlastnosti všech zkoušených typů upevnění pro danou oblast zkoušení. Byla odhalena závislost na velikosti statické sečné tuhosti a rezonanční oblasti jednotlivých systémů upevnění. Čím je upevnění tužší, tím se oblast nejvýznamnějších kmitočtů přesouvá směrem k vyšším frekvencím. Z uvedeného lze učinit závěr, že např. v České republice provozně ověřované upevnění typu W 21NT v kombinaci s vysoce pružnou podložkou pod patu kolejnice Zw 1000/150 HS 35 nelze doporučit do oblouků s malými poloměry, kde hrozí vznik skluzových vln u tratí v rychlostním pásmu RP2. Skluzové vlny jsou při jízdních rychlostech $100 \div 120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ významným přispěvatelem k úrovni zrychlení vibrací ve středněfrekvenčním pásmu $80 \div 400$ Hz. Díky svým vlastnostem by tedy upevnění W 21NT mohlo v tomto rychlostním pásmu přispět k rychlejšímu rozvoji uváděné kolejnicové vady. Vývojově mladší typ upevnění W 28NT s podložkou Zw 700NT/139/160-60 vykazuje v oblasti frekvencí do 400 Hz velmi dobré vlastnosti. Rezonanční pásmo tohoto upevnění je posunuto k hranici 590 Hz. Dynamické účinky jsou zde ze všech testovaných typů upevnění nejvýraznější. To může přispět jednak k vyšší akustické zátěži v okolí trati, ale zejména pak k urychlenému rozvoji vlnkovitosti. Při použití tohoto typu

upevnění je tedy velmi důležité dbát na preventivní údržbu pojižděné plochy kolo – kolejnice. U ostatních typů zkoušených upevnění lze na základě získaných dat potvrdit vhodnost použití pro předepsané oblasti použití uvedené v předpisu SŽDC S 3 [36].



Obr. 8 Frekvenční přenosové funkce upevnění Pandrol FCI; zdroj: autor



Obr. 9 Frekvenční přenosové funkce upevnění Vossloh W 14; zdroj: autor

Platí, že zpružněná upevnění jsou problematická při použití na tratích s možným výskytem skluzových a dlouhých vln. Naopak upevnění s tužšími podložkami pod patu kolejnice jsou méně vhodná v oblastech s možným výskytem vlnkovitosti. Platí, že čím vyšších hodnot dosahují lokální maxima funkce akcelerační, tím výraznější vliv má daná frekvence na dynamiku trati. Z nomogramu na obr. 2 pak lze získat, jaké děje v koleji se na daných frekvencích a při známé jízdní rychlosti obvykle projevují. Obecně lze také poznamenat, že každý typ upevnění je vždy nutné podrobit komplexnímu zhodnocení vhodnosti použití při zvažení místních podmínek, jako např. traťové rychlosti, poloměrů směrových oblouků, provozního zatížení apod.

Při porovnání výsledků laboratorního měření pomocí různých metod buzení bylo možné vypočítat určitý vliv umístění elektrodynamického budiče přímo na testované struktuře. Projevoval se na frekvencích $530 \div 570$ Hz. Globálně však bylo možné tento vliv na měření zanedbat. Pro porovnávací měření je však vždy nutné vybrat pouze jeden z nabízených způsobů buzení. Průběh frekvenčních přenosových funkcí je totiž poněkud odlišný. V obecnosti lze říci, že elektrodynamický budič nemá tak široký frekvenční rozsah jako rázové kladivo.

V rámci laboratorních zkoušek buzení rázem byl mj. testován vliv tvaru frekvenční odezvy funkce na velikosti utahovacího momentu vrtule upevnění. Výsledky neprokázaly pro utahovací momenty 150 – 200 – 250 MN funkční zákonitost ve změně průběhu frekvenční odezvy funkce.

Při posuzování vlivu stáří podložky pod patu kolejnice na změnu dynamických charakteristik upevnění je možné pozorovat nárůst dynamických účinků v oblasti

nad 500 Hz u kolejnice a pražce a v oblasti nad 250 Hz ve šterku. Tento nárůst není závislý na různých hodnotách utahovacího momentu vrtule. Hodnoty vypočtených útlumů vycházejí při těchto frekvencích zpravidla o 20 % až 40 % menší u starší podložky. Porovnávány mezi sebou byly pryžové podložky WU 7 z roku 2002, resp. z roku 2012. Vhodnějším materiálem vůči ztrátě výchozích parametrů podložek vlivem stárnutí pravděpodobně budou namísto pryže různá syntetika.

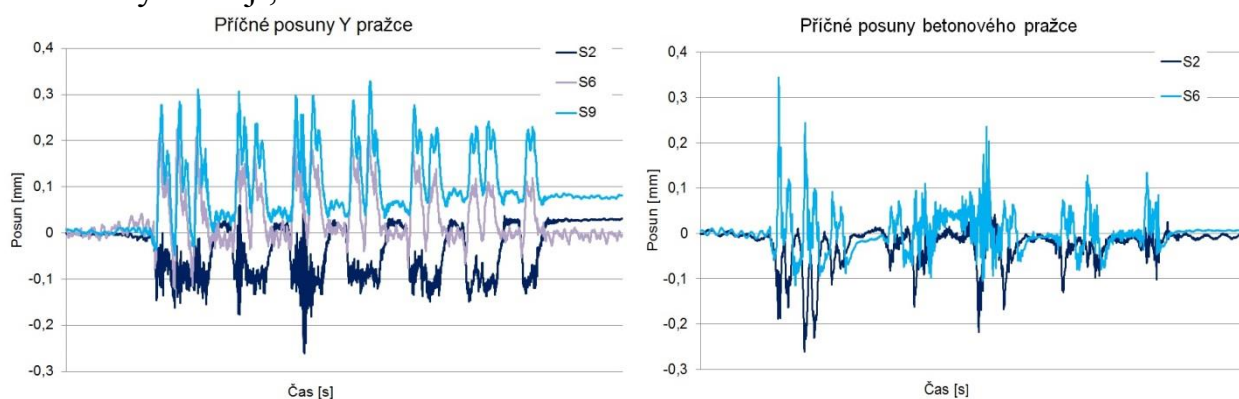
6.2 MĚŘENÍ IN SITU

V rámci měření in situ byla provedena v lokalitě Bílovice nad Svitavou doplňková měření k laboratorním měřením. Jako budicí prostředek bylo použito rázové kladivo. Z měření in situ je patrný trend snižování významných středních kmitočtových oblastí na kolejnici i na pražci o přibližně 100 ÷ 150 Hz směrem k počátku i snížení amplitudového spektra. Toto platí pro obě srovnávaná upevnění FC I i W 14. Měřeními nebyla prokázána příčina tohoto jevu. Souvislosti lze nejpravděpodobněji spatřovat v průběžně podepřené kolejnici a v působení osových sil a napětí v bezстыkové koleji, což nebylo v laboratorních podmínkách zohledněno. Lehce odlišná charakteristika obou zkoumaných upevnění ve vyšších frekvenčních pásmech pak pravděpodobně rovněž souvisí s obecně složitějšími vazbami kolejnice – pražec – kolejové lože in situ, které nelze v laboratorních podmínkách plně simulovat. Menší amplitudy frekvenčních přenosových funkcí vypovídají o roznášecích schopnostech kolejového roštu a pravděpodobně i o vlivu reálných podmínek uložení.

Z měření odezvy železničního svršku na reálné zatížení vyplynulo, že zásadní vliv na charakter dynamických účinků vozidla na trať má technický stav vozidla a trati, nápravové zatížení, jízdní rychlost vozidla a místní podmínky na trati. Technický stav trati a vozidla se nejvíce projevuje v amplitudovém spektru pásma frekvencí nad 300 Hz. Naopak nápravové zatížení a jízdní rychlost je zásadním přispěvatelem k nárůstu dynamických účinků na nízkých frekvencích do 80 Hz. Zvyšující se rychlost má také za následek frekvenční posun významných kmitočtových oblastí. Mezi velikostmi hraničních frekvencí a jízdní rychlostí přitom platí přímá úměra. Čím více je vozová skladba vlaku rozmanitá a čím jsou vlaky delší, tím širší frekvenční spektrum zrychlení vibrací vybudí. S rostoucí vzdáleností místa měření od zdroje vibrací, tedy od pojížděné hrany kolo – kolejnice, se zužuje pásmo důležitých frekvencí. Těžiště frekvenčního pásma se zpravidla současně s tím posouvá k nižším frekvencím. Zároveň se snižuje i úroveň amplitudového spektra. Poměr snížení amplitudového spektra je nepřímo úměrný tuhosti. Čím je konstrukce tužší, tím menší je rozdíl mezi úrovní vibrací na kolejnici a na pražci, na pražci a v kolejovém loži, atd. Největších skoků v úrovni vibrací, zejména mezi kolejnicí a pražcem, je dosahováno u zpružněných typů upevnění.

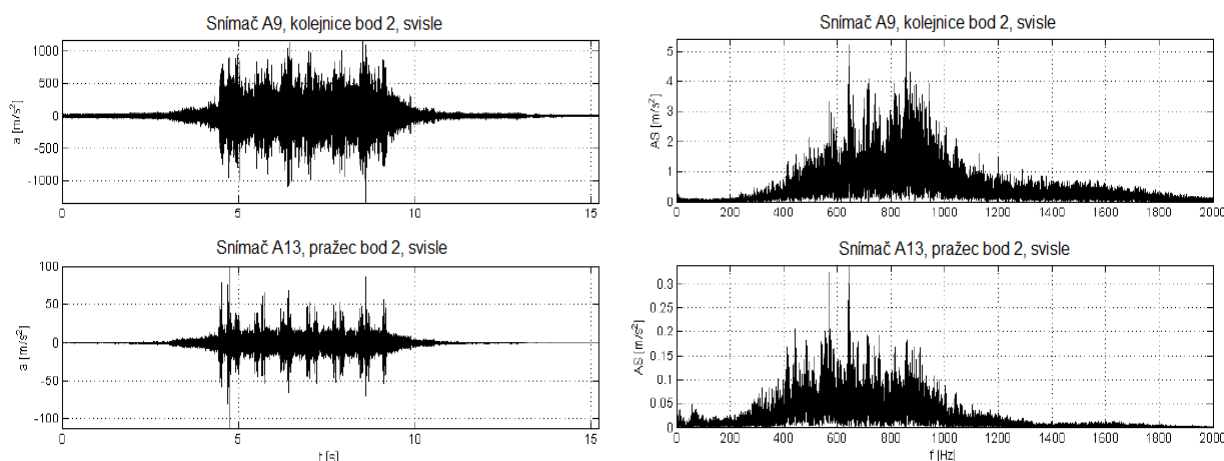
Podívám-li se blíže na testované systémy upevnění, předem je vhodné konstatovat, že pro zkoušenou oblast použití jsou předmětné typy upevnění stabilní. Analýza pohybů naznačuje, že upevnění kolejnic na betonových podporách vykazuje díky své vyšší hmotnosti výhodnější setrvačné vlastnosti, než kolejový rošt

s ocelovými pražci. Posuny kolejového roštu se v extrémních případech pohybují do 3 mm, přičemž nejvýraznější byly právě u upevnění S 15 na ocelových Y pražcích. Z výsledků je v některých případech viditelný ohyb pražce přes jeho středovou část, viz příklad na obr. 10. V oblouku vzniká v důsledku přenosu podélných sil na styku kolo – kolejnice mírné pootočení kolejového roštu vůči vertikální ose procházející těžištěm pražce. Dochází přitom k posouvání koncové části pražce a kolejnice na nepřevýšené straně oblouku v protisměru jízdy vlaku, zatímco na převýšené straně koleje má tento posun opačný charakter. Oba děje přitom probíhají současně. Pružnější typy upevnění umožňují vyšší posuny kolejnicového pásu. Na pražci však vycházejí z hlediska posunů srovnatelně, nebo dokonce výhodněji, než referenční tužší konstrukce.

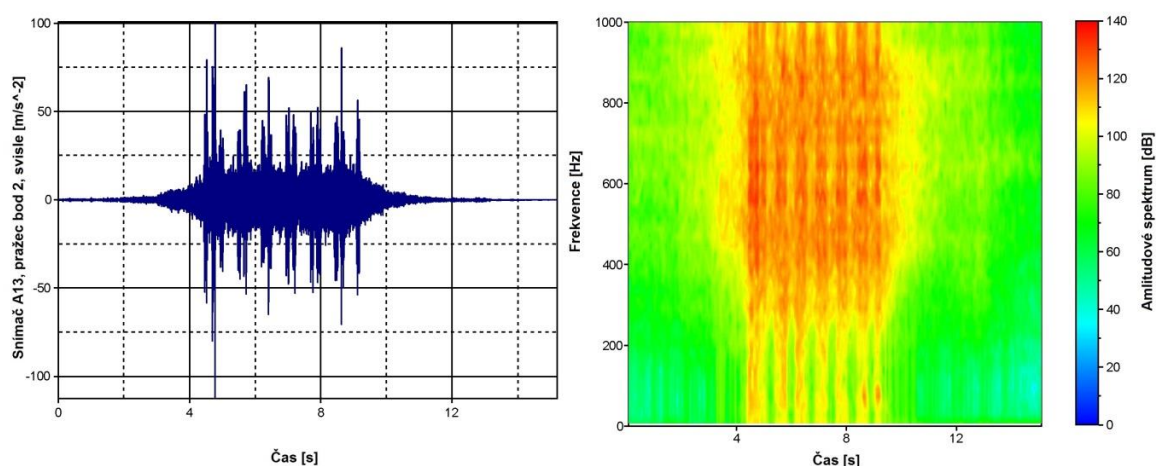


Obr. 10 Vlevo příčné posuny Y pražce, lokalita Popelín; Vpravo příčné posuny pražce SB 8P, lokalita Kamenný Malíkov; zdroj: autor

Vibrodiagnostika ukázala, že čím je upevnění tužší, tím se oblast nejvýznamnějších kmitočtů přesouvá směrem k vyšším frekvencím. Platí, že zpružněná upevnění jsou problematická při použití na tratích s možným výskytem skluzových a dlouhých vln. Naopak upevnění s tužšími podložkami pod patu kolejnice jsou méně vhodná v oblastech s možným výskytem vlnkovitosti. Je to způsobeno frekvenčními charakteristikami těchto upevnění. Upevnění S 15 vykazuje oproti ostatním typům upevnění odlišné vlastnosti. Průběh spektra zjištěného na Y pražci je velmi podobný průběhu spektra zjištěného na kolejnici. Nedochází tedy k výraznému útlumu vyšších frekvenčních složek, a tedy k výraznému posunu významných složek k nižším frekvencím, jak je tomu u ostatních typů zkoušených upevnění. Pružnější typy upevnění umožňují kolejnici více vibrovat. To má často za následek nárůst vibrací na frekvencích $400 \div 1500$ Hz a s tím související riziko vyšších akustických účinků. Z pohledu dynamických parametrů jsou předmětem zájmu nejen vibrace kolejového roštu, které mají vliv na kvalitu železničního svršku, ale také vibrace prostupující do širšího okolí trati. Rozvoj vibrací na hraně kolejového lože má různý průběh, zejména pak u konstrukce PJD, kde kolejové lože nahrazuje homogenní roznášecí vrstva HGT. Ta způsobuje, že klíčové frekvenční složky se z pásma nízkých kmitočtů přesouvají do oblasti $200 \div 650$ Hz. Útlum vibrací směrem do širšího okolí trati je ve vzdálenosti 7,5 m od osy koleje však u všech testovaných typů upevnění srovnatelný.

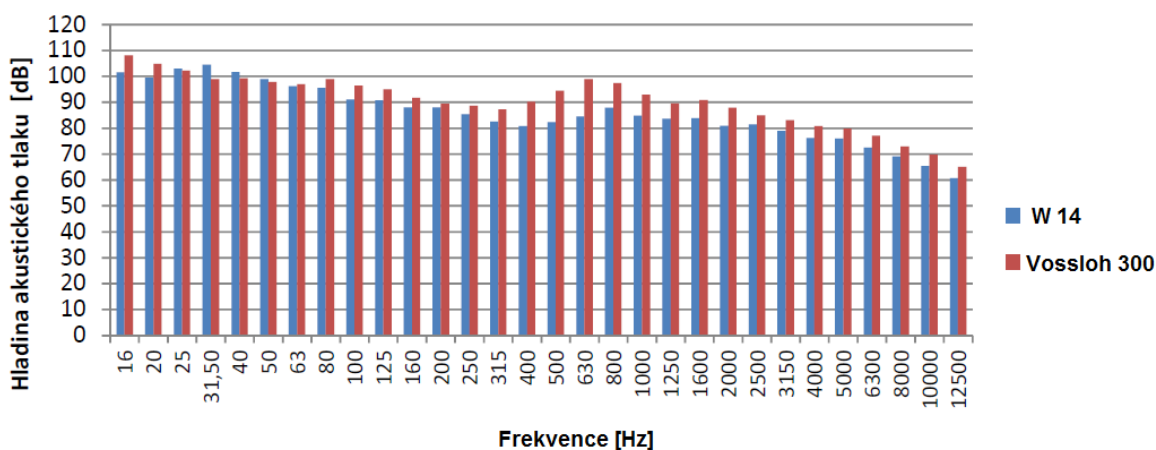


Obr. 11 Časové průběhy a frekvenční amplitudová spektra zrychlení vibrací upevnění FC I; lokalita Napajedla; zdroj: autor



Obr. 12 Časově-frekvenční transformace STFT – snímač A13; Upevnění FC I, lokalita Napajedla; zdroj: autor

U vlaků osobní přepravy se nejvyšší hodnoty akustického tlaku nacházejí na nejnižších středních frekvencích 16 Hz a 20 Hz. Naopak nejnižších hodnot je dosaženo na frekvencích 10 kHz a 12,5 kHz. V případě nákladních vlaků jsou nejvyšší hodnoty posunuty více ke středněfrekvenčnímu pásmu. Upevnění S 15 na ocelových pražcích tvaru Y nepředstavuje oproti počátečním předpokladům zvýšenou hlukovou zátěž. Provozní akustická měření prokázala, že ocelové Y pražce nejsou z hlediska akustických vlastností o nic horší, než porovnávané betonové pražce. Nejhluchnější ze všech typů upevnění byla konstrukce PJD RHEDA 2000 s upevněním Vossloh 300. Nárůst součtové hladiny akustického tlaku v nejvíce slyšitelném pásmu 500 Hz až 5,0 kHz činí na bližším stanovišti v průměru 5 dB a na vzdálenějším stanovišti v průměru dokonce 7 dB.



Obr. 13 Třetinooktávová analýza průměrných hladin akustického tlaku – mikrofon M0, rychlíky a vlaky vyšší kvality; lokalita Třebovice v Čechách; zdroj: autor

Z analýzy také vyplynula zjištění, která nesouvisí přímo s konstrukcí železničního svršku, nýbrž s typem kolejového vozidla. Souprava řady 914+814 RegioNova dosahuje v měřicích úsecích nejvyšších hladin expozice průjezdu TEL, přestože jízdní rychlosti ani nápravové zatížení soupravy nejsou nejvyšší. Vlak je tak pro současné četné užívání na regionálních tratích v silně zastavěném území nevhodný. Nárůst hladiny TEL ve vzdálenosti 7,5 m od osy koleje vzhledem k ostatním měřeným vlakům srovnatelné rychlosti lze vyčíslit středními hodnotami 3 dB(A) až 5dB(A), v extrémních případech až 7 dB(A). Motorový vůz řady 841 RegioSpider zase vykazuje ve frekvenčním spektru zrychlení vibrací velké amplitudy v ostře ohraničené oblasti kolem frekvence 520 Hz. Pravděpodobnou příčinou je rozptylové magnetické pole trakčního motoru. Při uvažované maximální rychlosti vozidla $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ by tak v kombinaci extrémních podmínek (frekventované požívání vozidla a maximální výkon trakčních motorů) mohlo docházet u tužších typů upevnění k rozvoji vlnkovitosti o vlnové délce cca 65 mm.

7 ZÁVĚRY A DOPORUČENÍ

Experimentální měření, zejména in situ, je velmi složité organizačně připravit. Kromě vlastní tvorby metodiky měření je nutné zajistit souhlas správce infrastruktury s nachystaným měřením. Podání žádosti o povolení měřit je nutné provádět alespoň s měsíčním předstihem. Při výběru termínu měření je nutné zohlednit očekávané meteorologické podmínky a ověřit nežádoucí výlukovou činnost na trati, příp. jiná provozní omezení. Zejména počasí je komplikované takto dopředu odhadovat. V případě některých aktivních zkušebních úseků je navíc nutné sehnat souhlas výrobce či distributora s činností na zařízení. Vlastní měřické práce je nutné zaevidovat do systému cizích právních subjektů. To se provádí několik dní před měřickou činností u pověřeného zaměstnance příslušného úseku dráhy. Kontakty na tyto zaměstnance nejsou obecně nikde k dohledání. Při vlastním měření je nutné dodržovat bezpečnost práce. Všichni účastníci měření musí být řádně proškoleni, obeznámeni s metodikou měření a musí mít příslušná oprávnění ke

vstupu na provozovanou dopravní cestu. Při střežení úseků s traťovou rychlostí nad $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ je nutné zajistit spolehlivé spojení s dopravním zaměstnancem, který je povinen měřické skupině sdělovat aktuální dopravní informace. Tato činnost byla velmi často zajišťována formou dohody o provedení práce s místně příslušnou správou tratí. Vlastní měřická činnost pak je ovlivněna povětrnostními podmínkami, dopravní situací a omezeními vyplývajících ze špatně přístupných úseků provádění zkoušek. Jak by mělo takové měřicí stanoviště a obecně nově zakládaný zkušební úsek optimálně vypadat, jsem uvedl do přílohy dizertační práce.

Z realizovaných měření lze vyvodit řadu významných a obecně platných skutečností. Ty prakticky potvrzují výsledky předchozích prací [15, 16, 20]. Nově byly navrženy zásady výběru měřicího stanoviště a konkrétního měřicího profilu, včetně mezních kritérií přijetí. Pro měření in situ byla použita rozsáhlá modulární metodika měření. V rámci metodiky bylo definováno uspořádání čidel, doporučené typy a parametry čidel a měřicí aparatury, včetně nastavení parametrů měření. Pro měření v laboratoři byly stanoveny rozměry a uspořádání zkušebních vzorků. Zvolená metodika poskytuje dostatečné přesné výsledky a je možné ji využívat opakovaně. Umožňuje univerzální použití pro různé konstrukce železničního svršku. Moduly se dají spolu libovolně kombinovat.

Zvolený matematický aparát se při zpracování naměřených dat osvědčil. V časové oblasti vibrodiagnostiky a analýzy pohybového chování poskytnou lokální extrémy možnost indikovat umístění náprav vozidla i míru imperfekcí jednotlivých dvojkolí. Současně umožní získat informace o maximálních špičkových hodnotách zrychlení vibrací, tedy přeneseně o síle na kontaktu kolo – kolejnice. Velmi důležitou se jeví efektivní hodnota zrychlení vibrací RMS, která definuje energetický obsah měřeného signálu. Na jejím základě lze velmi jednoduše mezi sebou porovnávat jednotlivá měřená místa, stejně tak jako různé konstrukce. Jedním z nástrojů časové analýzy hluku je hladina expozice průjezdu TEL. Ta má přímou vazbu na ekvivalentní hladinu akustického tlaku. Pro zvýraznění vlivu hluku na lidský organizmus je možné daný signál upravit filtrem A. Časová analýza je užitečným nástrojem diagnostiky, přesto neposkytuje informace o frekvenčním složení parametrů testované konstrukce. Z toho důvodu byly při zpracování dat využity postupy frekvenční analýzy. Ve vibrodiagnostice i v analýze hluku byla použita rychlá Fourierova transformace FFT. Ta se osvědčila pro svoji názornost a rychlost výpočtu. Hodnocenými veličinami bylo amplitudové spektrum zrychlení vibrací a vážené amplitudové spektrum akustického tlaku. V úlohách akustiky se navíc standardně používá třetinooktávová analýza hladiny akustického tlaku, neboť umožňuje snadné srovnání v jednotlivých třetinooktávových pásmech. Pro vyjádření úrovně hluku ve vybraném frekvenčním intervalu jednočíslnou charakteristikou byl použit energetický součet třetinooktávových hladin akustického tlaku. V laboratorních úlohách byla stanovena přenosová funkce akceleratione. Z jejího průběhu lze snadno vymezit rezonanční pásma testovaných systémů upevnění kolejnic a stanovit útlumové charakteristiky významných špiček funkce akceleratione. Jako doplněk frekvenční analýzy zrychlení vibrací posloužila časově-frekvenční

analýza ve formě 2D hustotních spektrogramů amplitudového spektra zrychlení vibrací získaných krátkodobou Fourierovou transformací STFT. Ta pomohla uspokojivě vysvětlit vznik a původ vysokých hodnot zrychlení vibrací ve vybraných frekvenčních oblastech amplitudového spektra. Tento poznatek bylo nutné zohlednit při vzájemném porovnávání jednotlivých konstrukcí upevnění. Přesnost a vhodnost metody STFT závisí na volbě okénkové funkce, její velikosti a na překrytí jednotlivých segmentů. Aplikace metody vyžaduje získání určité zkušenosti pro „rozumné“ definování vstupních parametrů, a také při interpretaci jejího spektra. Z nelineárních metod časově-frekvenční analýzy byla teoreticky popsána časově-frekvenční transformace z Cohenovy třídy, tzv. Rihaczekova transformace. Charakteristickým rysem prezentované transformace je skutečnost, že její výsledné rozlišení v čase a frekvenci není limitováno tzv. Heisenbergovým principem neurčitosti. Tato skutečnost zahrnuje vysokou rozlišovací schopnost v časově-frekvenční rovině, která se projevuje "přesnou" lokalizací význačných frekvenčních komponent v čase. V současné době existuje také řada jiných, v praxi použitelných časově-frekvenčních transformací, které nepatří do Cohenovy třídy. Příkladem mohou být např. afinní a hyperbolické transformace, které jsou velkým příslibem pro další vývoj metod signálové analýzy.

7.1 KONFIGURACE ZAŘÍZENÍ NA MĚŘENÍ DYNAMICKÝCH ÚČINKŮ

Základem měřicího systému je použití čtyř snímačů zrychlení vibrací. Na trhu existuje velká řada malých ústředů, měřicích karet nebo jiných stavebnicově konfigurovaných zařízení, která jsou vybavena právě čtyřmi A/D kanály. Ze snímačů doporučuji vybrat tříosý snímač z paty kolejnice a jednoosý snímač z hlavy pražce, v případě oblouku na převýšené straně koleje. Zatímco na pražci je v drtivé většině případů dominantní svislý směr, na patě kolejnice to tak úplně neplatí. Zejména v úsecích v oblouku nabývají zásadního významu také podélné a příčné složky zrychlení vibrací. Snímače na kolejnici dokáží na základě časové a frekvenční analýzy předpovědět vznik kolejnicových vad v pojižděné ploše kolejnicového pásu, navíc je možné odhalit ploché kolo jedoucí soupravy. Celý systém je tak možné zapojit do systému centrálního dohledu diagnostiky závad jedoucích vozidel. Na základě kombinace dat z paty kolejnice a z hlavy pražce lze posoudit útlumové charakteristiky uzlu upevnění a sledovat jejich vývoj v čase.

V rámci zpracování signálu doporučuji automatizaci postupů. Pro analýzu dat doporučuji využít pokročilých metod umělé inteligence. Imperfekce oběžné plochy dvojkolí doporučuji hodnotit na základě časové analýzy. Jako hodnotící kritérium by mohl sloužit poměr mezi lokálním maximem a efektivní hodnotou zrychlení vibrací RMS, tzv. crest faktor, přičemž efektivní hodnota RMS by se počítala z celé délky vlaku. Výpočtem rychlé Fourierovy transformace FFT by bylo získáno amplitudové spektrum v rozsahu $100 \div 1000$ Hz, což je optimální rozsah pro rychlosti $100 \div 160 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Výhodou této transformace je, že je založena pouze na změřených datech. Na základě amplitudového spektra by byl stanoven deskriptor určující kritérium pro diagnostiku pojižděné hrany kolejnicového pásu. Tímto deskriptorem

může být energetický součet, hodnota amplitudového spektra průměrovaná počtem čar, příp. jiná popisná charakteristika signálové analýzy (statistický moment, atd.).

Konfigurace zařízení by měla být taková, aby umožňovala vzhledem k frekvenčnímu rozsahu měření do 1,0 kHz vzorkování minimální frekvenci 2,5 kHz. Měřicí systém musí poskytnout 12 bitové, příp. 24 bitové rozlišení při snímání měřených veličin s napěťovými nebo ICP vstupy a simultánní vzorkování. Dynamický rozsah vstupů musí být minimálně 80 dB. Systém musí být vybaven antialiasingovým filtrem pro každý kanál. Zařízení lze napájet dálkově z rozvaděče NN. Zařízení musí umožňovat zasílání naměřených dat na určený server do databázového systému, případně musí ukládat data, aby bylo možné provádět jejich fyzický sběr prostřednictvím SD karty nebo podobného média připojením k řídicí jednotce zařízení.

Snímače zrychlení vibrací doporučuji typu ICP a TEDS s vestavěným zesilovačem s proudovým napájením 4 mA. Snímač na kolejnici doporučuji tříosý s citlivostí $1 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ pro maximální zrychlení $5000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Snímač na pražci doporučuji jednoosý s citlivostí $10 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ pro maximální zrychlení $500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Jako alternativu lze pro minimalizaci finančních nákladů zvolit kapacitní snímače MEMS. Cena za jednoosý snímač MEMS se v současnosti pohybuje řádově v tisícičkorunách.

Z hlediska správné interpretace záznamu je vhodné měřit rychlost jízdy vozidla. Na trhu existuje celá řada zařízení, která je možné pro tyto účely použít. Praktická jsou zejména ta, díky nimž není nutné navyšovat počet A/D kanálů na měřicím zařízení, neboť jsou schopny využívat digitální vstupní kanály a hardwarová přerušování kontrolérů nebo měřicích karet. Do této kategorie patří různá PIR čidla, sériově zapojené infrabrány, ultrazvukové senzory apod. Pro účely měření rychlosti lze využít i odporové tenzometry nebo malé radarové zařízení s výstupem. Výhodou tenzometrů je, že umožňují současné měření kolové síly. Nevýhodou je pak to, že vyžadují poněkud složitější měřicí řetězec, který zahrnuje zapojení do můstku, zesilovač a filtry. Obě zařízení rovněž navyšují potřebný počet A/D kanálů.

Data z měření je možné ukládat do databázového systému k dalšímu využití. Doporučuji výstupy v textovém souboru. Výstupy by měly mít jednotný formát pro snadnou orientaci, práci s daty a možnost automatizace postupů vyhodnocení. Sběr dat je možné provádět fyzicky z řídicí jednotky měřicího zařízení nebo lépe přímým odesláním v reálném čase na určený server centrálního databázového systému. Ne všechna data je potřeba ukládat. Výhodnější je data průběžně předzpracovávat a ukládat pouze vybrané informace. Do procesu ukládání dat mohou být zahrnuty algoritmy inteligentního třídění a zpracování. Vyhodnocená data poskytnou informace o stavu a kvalitě dráhy a kolejového vozidla. Je možné je kombinovat s údaji z MVŽSv a na jejich základě zoptimalizovat údržbové práce. Optimalizace údržby spočívá v predikci ideální doby údržbového zásahu (broušení kolejnicových pásů, podbíjení apod.). Je prokázáno, že včasná a pravidelná preventivní údržba je v konečném důsledku méně finančně nákladná, než zásadní opravy a rekonstrukce tratí [38]. U systémů upevnění kolejnic je možné např. včasnou výměnou podložek

pod patu kolejnice předejít zvýšeným dynamickým účinkům v oblastech nad 500 Hz a tím příznivě ovlivnit negativní vlivy způsobující rozvoj vlnkovitosti koleje apod. Dále je možné získaná data zakomponovat do systému centrálního dohledu diagnostiky závad jedoucích vozidel. Tím lze odhalit „vadná“ vozidla a po jejich provozovateli prokazatelně požadovat smluvní penále. Tímto preventivním opatřením je drážní infrastruktura chráněna před zvýšenými dynamickými účinky vyvolanými vozidly s poruchami jízdní plochy dvojkolí, neboť provozovatelé drážní dopravy budou nepřímo donuceni udržovat svá vozidla v dobrém technickém stavu. Uložená data mohou posloužit nejen pro účely státní správy, ale také pro projekci a vývoj a pro sledování vlivu na okolí. Pro jejich vyhodnocení je vhodné využít principů fuzzy logiky, neuronových sítí, genetických optimalizačních algoritmů, apod.

7.2 DOPORUČENÍ

Na základě získaných zkušeností a ověření v praktických aplikacích doporučuji doplnit současný proces vývoje a výroby upevnění kolejnic o vibrodiagnostiku. Pro dané účely se velmi osvědčila metoda stanovení přenosových funkcí akcelrance systému upevnění vybuzeného rázovým kladivem, příp. jiným typem budiče. Na jejím základě lze popsat silné a slabé stránky zkoušeného upevnění, predikovat možné chování v koleji a získat cenná data pro výpočtové modely. Metodika šetří čas a peníze výrobcí upevnění. Napomáhá v optimalizaci výrobku před samotným uvedením na trh, případně pomáhá odhalit různé děje spojené s provozem. V rámci provozního ověřování doporučuji doplnit postupy normy ČSN EN 13146-8 metodikou pro sledování dynamicko-akustických parametrů upevnění pod jedoucím vozidlem. Dynamicko-akustické parametry umožňují popsat testovanou konstrukci v reálných podmínkách na trati a při reálném zatížení.

Pro kontinuální měření v rámci optimalizace údržby a doplnění systému diagnostiky jedoucích vozidel se doporučuji věnovat návrhu a vývoji měřicího zařízení a systému centrální databáze. Daná problematika je předmětem kapitoly 7.1. Systém má poskytnout cenné informace nejen pro správce dráhy, ale rovněž pro subjekty zabývajícími se návrhem, výrobou a výzkumnými činnostmi v oblasti železničních konstrukcí a staveb.

8 BIBLIOGRAFIE

- [1] Vyhláška Ministerstva dopravy č. 177/1995 Sb., kterou se vydává stavební a technický řád drah, ve znění pozdějších předpisů.
- [2] Česká technická norma ČSN 73 6360-2 vč. změny Z1. *Konstrukční a geometrické uspořádání koleje železničních drah a její prostorová poloha – Část 2: Stavba a přejímka, provoz a údržba*. Říjen 2009.
- [3] Nařízení komise č. 1299/2014, o technických specifikacích pro interoperabilitu, subsystém infrastruktura železničního systému v Evropské unii. 18. listopad 2014. 6 stran textu. 103 stran příloh.
- [4] České technické normy řady ČSN EN 13481. *Železniční aplikace – Kolej – Požadavky na vlastnosti systémů upevnění*.
- [5] MORAVČÍK M., MORAVČÍK M.: *Mechanika železničních tratí*. EDIS Žilina. 695 stran. ISBN 80-7100-983-0.
- [6] ESVELD C.: *Modern Railway Track*, Second edition. MRT Production, Delf. 2001. 654 stran. ISBN 90-800324-3-3.
- [7] TIMOŠENKO, S. P. *Method of Analysis Statistical and Dynamical Stresses in Rails*. Second International Congress of Applied Mechanics. Curych. 1927. 14 stran.
- [8] FRÝBA, L. *Vibration of Solids and Structures under Moving Loads*. Third edition. Academia. Praha. 1999. 494 stran. ISBN 0-7277-2741-9.
- [9] České technické normy řady ČSN EN 13146. *Železniční aplikace - Kolej - Metody zkoušení systémů upevnění*.
- [10] Služební rukověť SŽDC SR 103/4. *Využívání měřicích vozů pro železniční svršek s kontinuálním měřením tratě pod zatížením*. Správa železniční dopravní cesty, státní organizace. Praha. 2010.
- [11] ZVĚŘINA P.: *Provedení zkoušek příčného odporu ocelových práčů tvaru Y ve zkušebním traťovém úseku Liberec – Tanvald a jejich vyhodnocení*. Výzkumná zpráva. VUT v Brně. Říjen 2008. 77 str.
- [12] VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav železničních konstrukcí a staveb. *Namáhání železničního svršku při $V = 200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$* . Závěrečná zpráva. Červen 2002.
- [13] TOMANDL V.: *Analýza dynamických parametrů kolejnicových upevnění*. Diplomová práce. VUT v Brně. 2007. 145 stran. 204 stran příloh.
- [14] INNOTRACK, Innovative Track Systems. International Union of Railways (UIC), Paris. 2010. ISBN 978-2-7461-1850-8.
- [15] RIVAS, Railway Induced Vibration Abatement Solution Collaborative Project. Seventh Framework Programme - project co-funded by the European Commission. International Union of Railways (UIC), Paris. 2013. <<http://www.rivas-project.eu/>>.
- [16] QCITY, Quiet City Transport. Sixth Framework Programme - project co-funded by the European Commission. 2005. <<http://www.qcity.org/>>.
- [17] EWINS D. J.: *Modal Testing – Theory, Practice and Application*. England: Research Studies Press Ltd. 2000. ISBN 0-86380-218-4.
- [18] HLAVÁČEK J.: *Metodika měření a vyhodnocení vibrací od železničního provozu šířící se zemí*. CIDEAS. Dílčí výzkumná zpráva za rok 2007.
- [19] HLAVÁČEK J.: *Metodika pro měření akustických parametrů kolejových vozidel podle TSI, subsystém „Kolejová vozidla – hluk“*. Projekt MD ČR Databáze hlukových zdrojů na železnici. Technická zpráva ze dne 18. 12. 2006. 60 stran.
- [20] SMUTNÝ J., PAZDERA L.: *The experimental analysis of dynamic processes related to railway transport*. Akademické nakladatelství CERM. Brno. 2012. ISBN 978-80-7204-827-4.
- [21] COHEN L.: *Time-Frequency Analysis*. Prentice Hall PTR. Englewood Cliffs. New Jersey. 1995.
- [22] Předpis SŽDC Bp1. *Předpis o bezpečnosti a ochraně zdraví při práci*. Správa železniční dopravní cesty, státní organizace. Praha. 2013.
- [23] Služební rukověť SŽDC SR 103/4(S). *Využívání měřicích vozů pro železniční svršek s kontinuálním měřením tratě pod zatížením*. Odbor traťového hospodářství (OTH). Správa železniční dopravní cesty, státní organizace. Praha. 2010.
- [24] Česká technická norma ČSN EN 15610. *Železniční aplikace – Emise hluku – Měření drsnosti povrchu kolejnic ve vztahu k hluku valení*. Prosinec 2009.

- [25] Česká technická norma ČSN EN 15461+A1. *Železniční aplikace – Emise hluku – Charakterizace dynamických vlastností úseků koleje pro měření hluku při průjezdech*. Červenec 2011.
- [26] EBERBASCH D., MÜLLER-BORUTTAU F. H.: *Dynamische Wegmessungen im Gleis – eine unverzichtbare Methode zur Auswahl neuer Oberbaukomponenten*. Eisenbahntechnische Rundschau. 1996. Roč. 45. Čís. 5. 10 stran. ISSN 0013-2845.
- [27] INNOTRACK GUIDELINE. *Method of track stiffness measurements*. Deliverable D2.1.11. Integrated Project No. TIP5-CT-2006-031415. 2010. 36 stran.
- [28] ARRAIGADA M., PARTL M.: *Calculation of Displacements of Measured Accelerations, Analysis of Two Accelerometers and Application in Road Engineering*. 6th Swiss Transport Research Conference. Monte Verità – Ascona. 15. – 17. března 2006. 31 stran.
- [29] Směrnice SŽDC č. 67. Č. j. S 35410/11 – OTH. *Systém péče o kvalitu v oblasti traťového hospodářství*. Správa železniční dopravní cesty, státní organizace. Praha. Srpen 2011.
- [30] Česká technická norma ČSN EN ISO 3095. *Akustika – Železniční aplikace – Měření hluku vyzařovaného kolejovými vozidly*. Březen 2014.
- [31] ZELENKA J., KOHOUT M.: *Možnosti ovlivnění jízdních a vodících vlastností kolejových vozidel parametry dopravní cesty*. Nová železniční technika 3/2010. KPM CONSULT, a.s. Brno. 2010. 5 stran. ISSN 1210-3942.
- [32] BREPTA R., PŮST L., TUREK F.: *Mechanické kmitání*. Nakladatelství Sobotáles. Praha. 1994. 592 stran. ISBN 80-901684-8-5.
- [33] LIEBERENZ, K., WEISEMANN U.: *Geokunststoffe in dynamische belasteten Erdbauwerken an Eisenbahnstrecken*. Rail International – Schienen der Welt. Prosinec 2002. 10 stran.
- [34] WETTSCHUREK R.: *Geräusche und Erschütterungen aus dem Schienenverkehr*. Zkrácená verze habilitační práce. Der Technischen Universität Berlin. 2005. 26 stran.
- [35] Česká technická norma ČSN ISO 1996-1. *Akustika - Popis, měření a hodnocení hluku prostředí - Část 1: Základní veličiny a postupy pro hodnocení*. Srpen 2004.
- [36] Předpis SŽDC S 3. *Železniční svršek*. Ve znění změny č. 1 a změny č. 2. Správa železniční dopravní cesty, státní organizace. Praha. 2008.
- [37] Předběžná česká technická norma ČSN P ENV 13005. *Pokyn pro vyjádření nejistoty měření*. Listopad 2005.
- [38] FUNKE H.: *Broušení kolejnic*. Agentura ELKA Press. Praha. 1992. 122 stran.

8.1 SOUVISEJÍ PUBLIKACE AUTORA

Assessment of dynamic parameters of rail fastening. Smutný, Jaroslav, Pazdera, Luboš, Tomandl, Vladimír a Seelmann, Herbert. 2016. Žilina: Žilinská univerzita, 2016, Communications 3/2016. ISSN 1335-4205.

Assessment of the Effectiveness of Low-Height Noise Brens Barrier. Smutný, Jaroslav, Tomandl, Vladimír a Pazdera, Luboš. 2015. České Budějovice: Studio D – akustika s.r.o., 2015, Akustika, roč. 23, č. 1. ISSN 1801-9064.

Acoustic Properties of Track Grid with Y- Shaped Steel Sleepers. Smutný, Jaroslav, Pazdera, Luboš, Tomandl, Vladimír a Vukušič, Ivan. 2013. České Budějovice: Studio D – akustika s.r.o., 2013, Akustika, roč. 19, č. 1. ISSN 1801-9064.

Dynamické vlastnosti kolejového roštu s Y pražci. Smutný, Jaroslav, Tomandl, Vladimír a Vukušič, Ivan. 2011. Ostrava: Konstrukce Media s.r.o., 2011, Silnice Železnice 3/2011. ISSN 1801-822X.

Chování kolejového roštu při průjezdu vozidla obloukem. Smutný, Jaroslav, Tomandl, Vladimír a Vukušič, Ivan. 2011. Praha: ČVUT, Falulta stavební, 2011, Stavební obzor, roč. 20, č. 2. ISSN 1210-4027.

Snižování hluku od železniční dopravy aplikací kolových akustických absorbérů. Smutný, Jaroslav, Tomandl, Vladimír a Vukušič, Ivan. 2011. Brno: KPM Consult, a.s., 2011, Nová železniční technika, roč. 19, č. 1. ISSN 1210-3942.

Dynamická a akustická analýza pružného upevnění kolejnic bez podkladnic. Smutný, Jaroslav, Tomandl, Vladimír a Pazdera, Luboš. 2009. Praha: ČVUT, Falulta stavební, 2009, Stavební obzor, roč. 18, č. 8. ISSN 1210-4027.

9 CURRICULUM VITAE

Osobní údaje

Jméno / Příjmení	Vladimír Tomandl
Adresa	Běloruská 518/20, 625 00 Brno
Národnost	Česká
Datum a místo narození	19. 3. 1983, Dačice

Vzdělání

Rok	2008 – dosud
Titul, kvalifikace	Postgraduální studium
Název školy (organizace)	Fakulta stavební VUT v Brně, Veveří 331/95, 602 00 Brno, ČR
Rok	2002 – 2007
Titul, kvalifikace	Ing.
Název školy (organizace)	Fakulta stavební VUT v Brně, Veveří 331/95, 602 00 Brno, ČR

Odborná praxe

Roky	2007 – dosud
Zaměstnání nebo postavení	Systémový specialista
Činnosti a odpovědnosti	Specialista pro železniční infrastrukturu, hlavní posuzovatel shody výrobků s TSI
Název a adresa zaměstnavatele	Výzkumný Ústav Železniční a.s., Novodvorská 1698, 142 01 Praha 4

Vědecko výzkumná činnost

Roky	2011 – 2015
Název projektu, typ projektu	Zvýšení kvality jízdní dráhy ve výhybkách pomocí zpružnění Program aplikovaného výzkumu a experimentálního vývoje ALFA
Činnosti a odpovědnosti	řešitel dílčího úkolu
Roky	2010
Název projektu, typ projektu	Komplexní monitoring a analýza dynamicko-akustických jevů v koleji Specifický vysokoškolský výzkum na VUT v Brně
Činnosti a odpovědnosti	řešitel

Členství v pracovních skupinách a komisích

Roky	2011 – dosud
Název pracovní skupiny nebo komise	CER SG PRM Pracovní skupina pro technické specifikace interoperability týkající se osob s omezenou schopností pohybu a orientace
Činnosti a odpovědnosti	člen skupiny
Roky	2011 – dosud
Název pracovní skupiny nebo komise	Implementační skupina ČD Interoperabilita osob s omezenou schopností pohybu a orientace
Činnosti a odpovědnosti	člen skupiny

10 ABSTRACT

Theoretical analysis (i.e. simulation) promoted by the laboratory tests of final product is the important aspect for determination relating to choice and using the new infrastructural constituent. However, the laboratory analysis does not need to make conclusive results in some cases. At that time, it is necessary to complete the process of validation by the measurement in-situ (directly in the track section). The European legislation requires the long-term monitoring of the test constructions in this case. During this time, both the periodic monitoring of the chosen parameters and the following comparison with reference construction are recommended. The reference construction shall be inserted to the same track section and in the same time period as well as the test construction. The track gauge, the longitudinal shifts of rails vis-a-vis the sleepers, the clamping force of fastening, the rail head profile, the sleepers and the state of rail fastenings are possible to classify like the long-term monitored parameters. All these characteristics are so-called static. They are checked in time when no carriages pass through the monitored track section. However, the analysis and determination of the test construction behaviour (dynamic characteristic) are the most accurate by the moving load.

Dissertation thesis is focused on measurement and analysis of the dynamic effects at the plain line. The aim of the thesis is the completion of recent system of the new track structures verification for the dynamic parameters observe. Methodology of the measurement and convenient mathematical apparatus for analysing the dynamic effects is proposed.