

Certifikovaná metodika

Hodnocení dynamických účinků působících na výhybky

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební

Ústav železničních konstrukcí a staveb

Autoři

Prof. Ing. Jaroslav Smutný, Ph.D.

Prof. Ing. Luboš Pazdera, CSc.

Ing. Ivan Vukušič

Obsah

1	Anotace	3
2	Úvod	3
3	Cíle metodiky	3
4	Popis metodiky	4
4.1	Analýza pohybového chování konstrukce	4
4.2	Analýza šíření vibrací u výhybek	6
4.3	Měření deformace (napětí) v konstrukci	12
4.4	Navržené metody signálové analýzy	12
4.5	Definice a nastavení měřícího hardware	13
4.6	Obecné podmínky měření	14
4.7	Příklady analýzy	16
5	Srovnání novosti postupů	20
6	Popis uplatnění certifikované metodiky	20
7	Ekonomické aspekty	20
8	Seznam použité literatury	21
9	Seznam publikací, výstupy z originální práce	21

1 Anotace

Metodika je věnována analýze dynamických účinků od kolejové dopravy působící na železniční svršek, konkrétně na výhybky. Zahrnuje měření a analýzu pohybového chování výhybky. Jde o měření posunů ve vybraných částech konstrukce. Dále zahrnuje analýzu šíření vibrací ve vybraných částech výhybky od kolejnice přes pražec do kolejového lože. Součástí je také měření a analýza napětí ve vybrané části konstrukce. Metody analýzy zahrnují postupy v časové a frekvenční rovině.

2 Úvod

Se zaváděním vyšších rychlostí v železniční dopravě se objevují nové okruhy problémů. Dynamické účinky nepříznivě působí na kolej a vedou k rozvoji vad a poruch. Velkým problémem jsou zejména výhybky, které patří ke klíčovým komponentům tratě z pohledu spolehlivosti provozu i údržby. Je nezbytné hledat nové metody pro hodnocení dynamických jevů působících na konstrukci výhybek. Současné metody i používaný matematický aparát neposkytují komplexní výsledky nezbytné pro vhodnou a včasnou údržbu.

Dosud nebyl podán ucelený systém hodnocení dynamických účinků od kolejové dopravy na výhybky. Z tohoto důvodu realizované měření a analýzy neposkytují ucelenou skladbu informací a nejsou vzájemně srovnatelné. Neexistence hodnotící metodiky brzdí vývojové práce v oboru kolejové dopravy i optimalizaci provádění údržbových a opravných prací a jejich správné načasování.

3 Cíle metodiky

Cílem předložené metodiky je definovat teoretické i praktické zásady pro analýzu dynamických účinků od kolejové dopravy působící na výhybky. Důraz je kladen na důkladné zdůvodnění navržených postupů i jejich srozumitelné vysvětlení. Navržené postupy jsou sestaveny tak, aby bylo možné je používat do různé hloubky s ohledem na zaměření konkrétní analýzy. Aplikace metodiky poskytne informaci jak o šíření vibrací, tak o kvalitě uložení pražců v kolejovém loži ve vybraných částech výhybek. Současně poskytne informace o napětí v nejméně exponované části konstrukce.

Metodika zahrnuje obecné přístupy, které mají být společné všem měřičským pracím. Tento požadavek vyplývá z potřeby srovnatelnosti i vhodné interpretace výsledků. Metodika zahrnuje popis měřících míst na konstrukci, použité veličiny, typy a vlastnosti snímačů, metody analýzy i základní rámec pro použité přístrojové vybavení. Každé pracoviště, které

použije certifikovanou metodiku, musí mít jistotu, že při jejím dodržení budou získané výsledky průkazné, opakovatelné a napříč oborem srovnatelné.

4 Popis metodiky

Nejdůležitějším místem výhybky z hlediska dynamických účinků je oblast přechodu z křídlové kolejnice na hrot srdcovky, kde dochází, v závislosti na kvalitě geometrie přechodu, při průjezdu kola k dynamickému rázu. Tento ráz se přes pražce přeneso do kolejového lože, které je tím extrémně namáháno, což vede k obroušování zrn kameniva šterkového lože na styku s pražcem, v důsledku čeho dochází k degradaci tvaru kolejového lože pod pražcem a následujícímu nedostatečnému podepření výhybky. Pokud není výhybka dostatečně podepřena, zhroutlí se geometrie přechodu z křídlové kolejnice na hrot srdcovky a celý proces degradace se tím velmi urychlí. Proto je nezbytné věnovat těmto částem jízdní dráhy zvýšenou pozornost. Další oblastí vyžadující zvýšenou pozornost, je oblast výměnová.

Hodnocení dynamických účinků působících na výhybky, případně jejich jednotlivé části, je v rámci navržené metodiky rozděleno do tří základních oblastí. První část zahrnuje měření pohybového chování konstrukce, tedy analýzu pohybů (posunů) vybraných částí výhybky (svislé posuny vybraných pražců v srdcovce a výměně a zejména svislé posuny podél srdcovky a výměny) pod zatížením. Druhá oblast zahrnuje šíření vibrací ve vybraných částech výhybky včetně účinků vibrací na šterkové lože. Třetí část metodiky je věnována měření a analýze silového působení a napětí ve vybrané části konstrukce.

4.1 Analýza pohybového chování konstrukce

K měření posunů na jednotlivých částech kolejového roštu metodika navrhuje přímé měření délek (posunů) pomocí indukčnostních snímačů délek. Tato metoda vyžaduje existenci tzv. srovnávacího bodu. Měřenou veličinou je časový průběh výchylky kmitání. Výhodou této metody je, že je možné využít kvalitních snímačů dráhy s dobrou linearitou a také skutečnost, že není nutné provádět žádné přepočty. Snímače délky jsou uchyceny na tzv. vztažný (srovnávací) bod. Vztažným (srovnávacím) bodem je myšlen rám, tvořený dvěma ocelovými tyčemi délky 80 cm a průměru 20 mm zatlučenými do kolejového lože a ocelovým nosníkem délky 64 cm, který je připevněn k ocelovým tyčím. Osová vzdálenost mezi tyčemi je navržena 60 cm, v kolejovém loži jsou zatlučeny do hloubky 65 cm. Pro měření byly vybrány dvě významné části – srdcovková a výměnová. Schéma rozmístění snímačů použitých pro měření a analýzu pohybového chování je zřejmé z obrázků Obr. 1 a Obr. 2. Z obrázku Obr. 1 je patrné, že v oblasti srdcovky bylo navrženo 8 snímačů posunu.

Snímače S0, S1, S4 a S7 jsou instalovány podél srdcovky výhybky. Údaje z těchto snímačů umožní vykreslit průhybovou křivku, která po délce srdcovky vzniká. Maximální průhyb je předpokládán u pražce přímo pod srdcovkou. Tato skutečnost je ověřena velkým počtem měření. Takto je možné vykreslit průhybové křivky při průjezdu vlakových souprav nebo průhybové křivky pod hnacími vozidly. Lze tak získat komplexní informaci o pohybovém chování pražců po délce srdcovky výhybky. Podotkněme, že snímač S0 je umístěn na 2. pražec před srdcovkou, S1 je umístěn na 1. pražec před srdcovkou, S4 je umístěn na pražec pod srdcovkou a S7 je umístěn na 1. pražec za srdcovkou, vše ve směru proti hrotu srdcovky dle Obr. 1.

Snímače S2, S3, S4, S5 a S6 v dané metodice jsou rozmístěny po délce výhybkového pražce pod srdcovkou tak, aby sledovaly jeho pohybové chování. Snímače S2 až S6 byly rozmístěny na pražec přímo pod srdcovkou v kolmém směru k ose koleje, to znamená podél pražce. Jde o nejvíce zatížený výhybkový pražec, kde kolo přechází z křídlové kolejnice na hrot srdcovky a naopak. Podotkněme, že snímače S2 a S6 jsou umístěny na hlavě pražce, S3 – umístěn v ose přímé větve, S4 – umístěn v blízkosti hrotu srdcovky v přímé větvi, S5 – umístěn v ose odbočné větve. Z realizovaných měření a analýz bylo ověřeno, že v místě kolejnic a srdcovky se pod pražcem často vytváří volné prostory, což je způsobeno zatěžováním od dvojkolí projíždějících vlakových souprav. Z tohoto důvodu je snímač pohybů S4 umístěn v blízkosti srdcovky výhybky. Pokud se výhybkou jezdí převážně v přímém směru a odbočný směr není příliš vytížen, může dojít i k nežádoucímu převýšení výhybkového pražce, případně k jeho nadzvedávání při průjezdu vozidla. Díky tomuto rozmístění snímačů je možné všechny tyto významné jevy zachytit. Vyhodnocení dat ze snímačů rozmístěných po délce pražce je obdobné jako u snímačů po délce srdcovky. Základním výstupem jsou grafy svislých pohybů pražce v závislosti na čase pojezdu. Opět je možné sestavit jednotlivé křivky pohybu pražce při průjezdu vozidla výhybkou. V každé pozici se předpokládá využití snímačů posunů s vestavěnou pružinou s rozsahem zdvihu 10 mm. Snímače posunu S0, S1, S2, S4, S6 a S7 jsou umístěny vždy v ose pražce a 220 mm od osy kolejnice, pokud to nebude možné, pak co nejbližší na ose pražce k výše popsanému místu (viz Obr. 1). Snímače S3 a S5 jsou v ose kolejí a na ose pražce (viz Obr. 1).

Obdobné je rozmístění snímačů ve výměně, viz Obr. 2. Navržený počet snímačů posunu je 5. Snímače v podélném směru vůči ose koleje S0, S1, S4 jsou upevněny podél přímého jazyka výhybky. Snímače jsou umístěny do místa, kde kolo přechází z ohnuté opornice na přímý jazyk. Je třeba u každé výhybky přibližně stanovit pražec, který je uprostřed tohoto

přechodu, neboť se s velkou pravděpodobností jedná o nejvíce namáhaný pražec. Snímače je poté třeba umístit následovně: S0 – na pražec za určeným pražcem, S1 – na určený pražec, S4 – na pražec před určeným pražcem, vše ve směru jízdy vlaku proti hrotu výhybky. Tyto snímače umožní vykreslit křivku průhybů, ale také maximální zatlačení pražců pod výměnou. Snímače S2, S3 a S4 budou rozmístěny na určený pražec v kolmém směru k ose koleje, tedy podél tohoto pražce. Umístění snímačů bylo zvoleno následovně – S0, S1, S3, S4 umístěné na hlavě pražce, S2 umístěn v ose koleje a na ose pražce. Snímače posunu S0, S1, S3, S4 jsou umístěny vždy v ose pražce a 220 mm od osy kolejnice, pokud to nebude možné, pak co nejbližší na ose pražce k výše popsanému místu (viz Obr. 2). Výstupem jsou grafy svislých pohybů pražce v závislosti na čase pojezdu. Měření se doporučuje realizovat při přejezdu soupravy přímoú větví výhybky, která je pojížděna plnou traťovou rychlostí.

V rámci měření pohybového chování významných částí výhybek budou naměřená data hodnocena v časové rovině s výstupem časového průběhu měřených veličin v daných místech konstrukce, dále budou zjištěny globální extrémy včetně jejich časového výskytu. Použitá jednotka - mm.

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

4.2 Analýza šíření vibrací u výhybek

Snímače jsou v rámci této části metodiky rozmístěny tak, aby bylo možné sledovat šíření vibrací na přechodu z křídlové kolejnice na hrot srdcovky. Z hlediska dynamických účinků je klasická (pevná) srdcovka výhybky nejvíce zatíženým místem. Při přejezdu kola vlaku přes žlábek mezi křídlovou kolejnicí a hrotem srdcovky dochází, vzhledem ke stavu geometrie přechodu, k většímu či menšímu rázu. Po nárazu kola se od povrchu srdcovky šíří vibrační energie směrem dolů k relativně tuhé podkladnici a pražci, na kterých je srdcovka uložena, dále je pak vibrační energie přenášena z pražce do štěrkového lože. Malá část energie je zachycena vnitřním tlumením samotné srdcovky, další malá část je zachycena podkladnicí a podložkou pod hrotem srdcovky, podložkou pod podkladnicí a také pražcem. Vzhledem k tomu, že celý systém je poměrně tuhý, je nemalá část přenesena až do štěrkového lože a podloží. Zde dochází k namáhání ostrých hran štěrkového lože a ty se začínají obušovat. Vzniklé jemnozrné části nepříznivě působí na soudržnost zrn a pod pražcem se začnou vytvářet volné prostory. Z tohoto hlediska je důležité zabývat se šířením vibrací ze

srdcovky až do šterkového lože, aby bylo možné navrhnout vhodná opatření ke snížení namáhání šterkového lože.

Pro snímání vibrací jsou zvoleny akcelerometry. Snímače zrychlení kmitání jsou v rámci této metodiky umístěny tak, aby byly schopny zachytit šíření vibrační energie ve významných částech konstrukce. Metodika předpokládá využití jednoho tříosého snímače zrychlení kmitání a šesti jednoosých snímačů zrychlení kmitání (Obr. 1). Tříosý snímač umístěný na patě křídlové kolejnice umožní sledovat velikost dynamického rázu, který působí na srdcovku výhybky (A4Z, A5X, A6Y). Ve svislém směru (A4Z) snímač zachytí velikost svislé složky dynamického rázu na srdcovku, resp. část, která bude přenesena do paty křídlové kolejnice. V podélném směru (A5X) zachytí velikost podélné složky dynamického rázu přenesené do paty křídlové kolejnice a v příčném směru (A6Y) boční rázy od dvojkolí. Další snímače jsou umístěny tak, aby bylo možné vystihnout šíření dynamického rázu ze srdcovky výhybky přes pražec až do šterkového lože (A3Z, A0Z) a šíření vibrační energie pražcem (A1Z, A2Z, A3Z, A7Z a A8Z). Metodika zahrnuje umístění snímačů následovně - tříosý snímač (A4Z, A5X, A6Y) na patě křídlové kolejnice pod srdcovkou, jednoosý snímač A3Z na pražci pod hrotem srdcovky, A0Z – na tyči, která je zapuštěna do šterkového lože v blízkosti hrotu srdcovky. Její délka je 80 cm a je zatlučena do šterkového lože do hloubky 65 cm, průměr tyče je 20 mm. Tyč slouží jako vlnovod. Snímače A1Z, A2Z, A3Z, A7Z a A8Z jsou umístěny přímo na pražci pod hrotem srdcovky výhybky a umožní sledovat šíření vibrační energie pražcem.

Pražec pod srdcovkou je po své délce v jednotlivých místech různě dynamicky namáhán. Snímače umístěné v ose koleje nám poskytnou představu, jak velká část dynamického zatížení se přenesou pražcem až do osy koleje. I přesto, že je při zřizování železniční dopravní cesty podbíjen pražec zejména v oblasti jeho hlav, tvoří se pod hlavami pražců vlivem provozu volné prostory. Následně je pražec podepřen v ose koleje. Z tohoto důvodu je důležité začlenit snímače na hlavy pražců. Umístění snímačů bylo zvoleno následovně:

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

- A8Z za hlavou pražce v odbočném směru

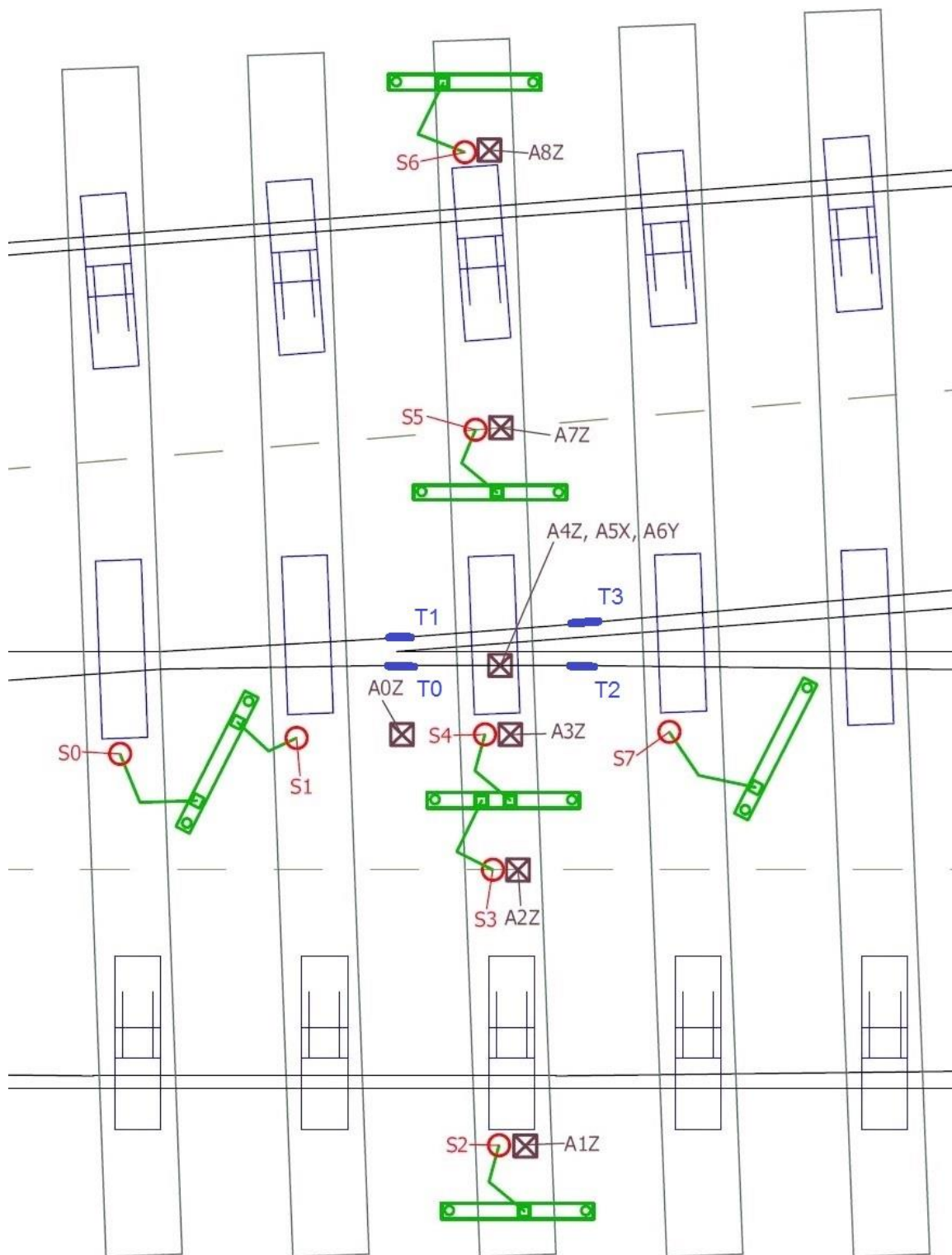
Snímače A1Z, A3Z, A8Z jsou umístěny 200 mm od osy kolejnice a v podélné ose pražce (viz Obr. 1). Snímač A0Z je v ose mezipražcového prostoru 200 mm od osy kolejnice (viz obr. 1). Tříosý snímač (A4Z, A5X, A6Y) je umístěn co nejbližší uzlu upevnění na patě křídlové kolejnice (viz obr. 1). Snímače A2Z a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

Mechanismus přenosu vibrací je u výměnové části (Obr. 2) obdobný jako u oblasti srdcovkové s předpokladem nižších hodnot vibrací. Je to způsobeno nepřerušovanou pojížděnou plochou kolejnice, kdy nákok postupně najíždí a opírá se o jazykovou kolejnici. Intenzita vibrací je tlumena kolejovým roštem, kdy malá část je utlumena již v kolejnici a její pryžovou podložkou. K dalšímu utlumení vibrací dojde v pražci, kde neutlumená složka je přenášena do štěrkového lože. I proto je metodika měření navržena obdobným způsobem, jako tomu bylo v oblasti srdcovky. Je sledován přenos vibrací z kolejnic, přes pražce až do štěrkového lože a roznos vibrací určeným pražcem. Sledované pražce jsou určeny, jak je popsáno výše u pohybového chování konstrukce. Snímače A3Z a A7Z jsou umístěny na patě ohnuté opornice, snímače A1Z a A2Z jsou umístěny na hlavě pražce a snímač A0Z na tyči ve štěrkovém loži. Délka tyče je 80 cm a je zatlučena do štěrkového lože do hloubky 65 cm, průměr tyče je 20 mm. Tyč slouží jako vlnovod. Tříosý snímač je umístěn na přímý jazyk v mezipražcovém prostoru (mezi snímače A3Z a A7Z). Tento snímač bude sledovat vibrace přenášené do přímé jazykové kolejnice, která není tak dobře upevněna jako opornice a lze zde očekávat větší zrychlení vibrací ve všech třech směrech (svislém A4Z, podélném A5X a příčném A6Y). Snímače A2Z, A8Z a A9Z budou sledovat roznos vibrací pražcem. Větší dynamické účinky lze očekávat při průjezdu výhybky v přímém směru plnou traťovou rychlostí, proto byla pro analýzu vybrána oblast ohnuté opornice a přímého jazyka.

Umístění snímačů bylo zvoleno následovně:

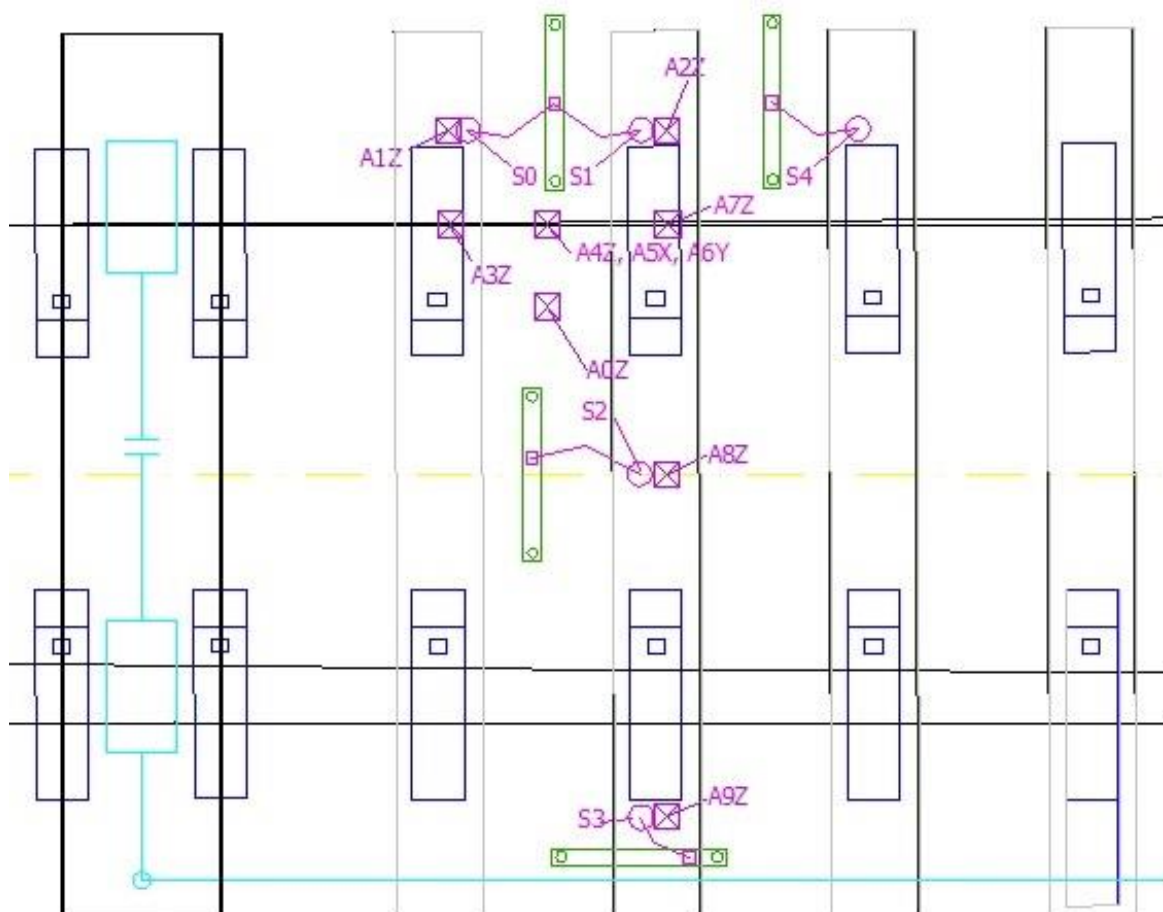
- A0Z – na tzv. měřicí tyči o délce 80 cm a průměru 20 mm, která je zapuštěna do štěrkového lože

- A1Z – na hlavě pražce před určeným pražcem (ve směru jízdy proti hrotu) na straně přímého jazyka
- A2Z – na hlavě pražce na určeném pražci na straně přímého jazyka
- A3Z – na patě ohnuté opornice nad pražcem, který je před určeným pražcem
- **A4Z, A5X, A6Y** – tříosý snímač na přímé jazykové kolejnici v mezipražcovém prostoru
- **A7Z** – na patě ohnuté opornice nad určeným pražcem
- **A8Z** – na určeném pražci v ose koleje
- A9Z – na hlavě pražce na určeném pražci na straně ohnutého jazyka



- ☒ piezoelektrický snímač zrychlení vibrací
- indukční snímač pohybů
- tenzometry

Obr. 1 Rozmístění snímačů pohybu (posunu) a vibrací, srdcovková část



Obr. 2 Rozmístění snímačů pohybu (posunu) a vibrací, výměnová část

Snímače A1Z, A2Z, A9Z jsou umístěny 200 mm od osy kolejnice a v podélné ose pražce (viz Obr. 2). Snímač A0Z je v ose mezipražcového prostoru 300 mm od osy kolejnice, ale vždy tak, aby nebránil při přestavění výhybky (viz Obr. 2). Tříosý snímač (A4Z, A5X, A6Y) je umístěn v ose mezipražcového prostoru a na jazykové kolejnici a nejlépe zespodu na ní uchycen (viz Obr. 2). Snímač A8Z je umístěn v ose koleje a na ose pražce (viz Obr. 2). Snímače A3Z a A7Z jsou umístěny co nejbližší uzlu upevnění na patě opornice z vnější strany (viz Obr. 2). Metodika předpokládá kostkové jednoosé a tříosé snímače s rozsahem $700 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ v poloze na pražcích, $7000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ v umístění na kolejnicích a $70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ve šterkovém loži. Snímané frekvenční pásmo je v rozsahu minimálně 1 Hz až 1 kHz. Jsou doporučeny snímače typu ICP a TEDS, tedy takové, které mají vestavěný zesilovač a jsou napájeny proudem 4 mA včetně vestavěné paměti s údaji pro jednodušší a rychlejší instalaci.

4.3 Měření deformace (napětí) v konstrukci

Sledování deformací a silového působení bude realizováno čtyřmi tenzometrickými snímači. V metodice je počítáno s umístěním čtyř tenzometrických snímačů v okolí srdcovky, jak je patrné z obrázku Obr. 1.

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

Z tohoto důvodu je navrženo umístění tenzometrů T0 a T1 uprostřed mezi prvním pražcem před hrotem a pražcem pod hrotem srdcovky a tenzometrů T2 a T3 uprostřed mezi pražcem pod hrotem srdcovky a pražcem za ním. Zároveň je doporučeno (je-li to možné) tyto tenzometry před měřením staticky kalibrovat z důvodu vypočtu velikost kolové síly.

Metodika předpokládá využití foliových odporových tenzometrů. Doporučuje se aplikace tenzometrů typu 1-LY11-6/120 (výrobce HBM, Německo). Pro nalepení je doporučeno jednosložkové lepidlo Z70. Na nainstalované tenzometry je nezbytné aplikovat krycí tmel (např. ABM75 – silikonový tmel s hliníkovou fólií). Metodika doporučuje nainstalované tenzometry zapojit třívodičově do čtvrtmostů k příslušné měřicí ústředně. Zjištěné hodnoty poměrných deformací je nutné přepočítat na hodnoty mechanického napětí podle vztahu $\sigma = E \cdot \varepsilon$ [Pa], kde je

σ ... mechanické napětí [Pa];

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

ε ... měřená poměrná deformace [-].

4.4 Navržené metody signálové analýzy

Informace o jakémkoliv technickém či fyzikálním ději je v signálu reprezentována časovými změnami okamžité hodnoty fyzikální veličiny, kterou signál popisuje. Měření v koleji a tedy také na výhybkách zahrnuje přechodové děje, které jsou ovlivněny stochastickými vlivy. K analýze takových signálů se ve světě i u nás běžně používají hodnocení v časové a frekvenční oblasti. V časové oblasti se převážně realizuje statistická analýza, případně analýza tlumení v čase. Zjišťují se statistické momenty, globální i lokální maxima a minima, realizují se statistické hypotézy.

Další vyhodnocení z časově amplitudové reprezentace není v mnoha aplikacích snadné ani výhodné. Proto se provádí transformace signálu z časové do jiné oblasti. Často lze získat důležité informace ve frekvenční oblasti. Pro přechod do této oblasti se používají různé druhy transformací a různé výpočetní metody. Nejpoužívanější a nejznámější metodou je Fourierova transformace a její některé modifikace.

Pro vyhodnocení šíření vibrací, po provedeném rozboru problematiky a realizovaných měřeních a analýzách, je navržena metodika hodnocení založená na použití následujících metod a parametrů:

1. Časová rovina

- Časové zobrazení průběhu zrychlení kmitání, jednotka - $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
- Výpis extrémů zrychlení kmitání včetně času působnosti, jednotka - $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
- Hodnocení efektivní hodnoty zrychlení kmitání, jednotka - $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$

2. Frekvenční rovina

- Frekvenční analýza s využitím průběhu amplitudového spektra (pro přechod z časové do frekvenční oblasti bude používán pro všechna měřící místa algoritmus Fourierovy transformace), doporučený frekvenční interval hodnocení 1 Hz až 1 kHz, jednotka - $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
- Pro prezentaci a zjednodušené vyhodnocení bude použita třetino-oktávová analýza, doporučený frekvenční interval hodnocení 1 Hz až 1 kHz, jednotka dB, vztažná hodnota $1\cdot 10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$

Pro vyhodnocení deformace (napětí) tenzometrickými snímači je navrženo hodnocení za použití následujících metod a parametrů v časové rovině:

- Časové zobrazení průběhu poměrné deformace, jednotka - $\mu\text{m}/\text{m}$
- Výpis lokálních a globálních extrémů napětí metodou přepočtu z poměrné deformace
- Doporučen je výpočet kolových sil

4.5 Definice a nastavení měřícího hardware

Metodika zahrnuje optimalizovaný počet snímačů posunu, zrychlení i deformace (napětí). Tento vychází z velkého množství předchozích měření a analýz. Z toho vychází také hardwarové požadavky na měřící systém. V oblasti srdcovky jde o 8 měřících kanálů pro snímače posunů, 9 měřících kanálů pro snímače vibrací a 4 měřící kanály pro tenzometrické snímače.

V oblasti výměny jde o 5 měřících kanálů pro snímače posunu a 10 měřících kanálů pro snímače vibrací. Podotkneme, že je možné pro vybrané potřeby realizovat měření v obou částech současně nebo odděleně.

Vzhledem k využívanému frekvenčnímu intervalu je použitá frekvence vzorkování pro každý kanál zvolena více než 2,5 násobek nejvyšší požadované frekvence, tedy 2500 Hz nebo vyšší. Měřicí systém musí poskytovat 16 bitové, případně 24 bitové rozlišení při snímání měřených veličin s napěťovými nebo ICP vstupy a simultánní vzorkování. Dynamický rozsah vstupů minimálně 80 dB. Systém musí být vybaven anti-aliasingovým filtrem pro každý kanál. Doporučuje se, aby každý měřicí kanál byl vybaven horno-propustnými filtry 0.1 Hz, 1 Hz, 10 Hz a alespoň 2-pólovým filtrem s volitelnými frekvencemi: 100, 300 Hz, 1kHz.

Pro měření tenzometry musí být měřicí ústředna vybavena čtyř kanálovým tenzometrickým modulem zabezpečujícím měřicí režim 1/4 můstku 120 Ω s interní kompletací na 1/4 můstek, doporučuje se více měřících rozsahů (např. 1 až 1000 mV/V), 5 V napájení mostu, 2-pólový filtr s minimálně 3 volitelnými frekvencemi: 30, 100, 300 Hz, doporučena charakteristika Butterworth, přesnost 0,05%.

Doporučuje se vybavení měřicího systému kamerovým záznamem. Vzhledem k velkému počtu měřících kanálů i velké vzdálenosti obou předmětných částí je možno využít dvou měřících systémů podobných vlastností s hardwarovou synchronizací.

4.6 Obecné podmínky měření

Správná funkčnost snímačů zrychlení i celého měřicího řetězce musí být před a po měření ověřena kalibračním vibrátorem. Stejně tak funkčnost snímačů délky (posunu) včetně celého měřicího řetězce musí být ověřena Johansonovými kostkami. Doporučuje se pod snímače umístit vyrovnávací podložky.

Spouštění a zastavení záznamu měření je možné buď ruční s viditelným nastavením značek nebo pomocí hardwarového řešení (např. infračervené spouštěcí brány, případně jiný spouštěcí systém).

V průběhu měření je vhodné zaznamenávat základní meteorologické údaje (teplota, vlhkost, atmosférický tlak). Metodika doporučuje interval měření 1 hod. V průběhu měření vlakových souprav je měřena rychlost pojezdu souprav. Při srovnání jednotlivých řešení se předpokládá měření a analýza podobných vlakových souprav jedoucích přibližně stejnou rychlostí (rozdíl do 10 km/h). Metodika doporučuje orientaci na různé typy vlakových souprav. Součástí každého realizovaného měření musí být protokol o realizaci měření. Ten musí zejména obsahovat popis dané lokality včetně objektu měření, cíle měření, soupis

snímačů a jejich rozmístění, meteorologické podmínky, dále pak informace o měřených vlakových soupravách (typ vlaku, typ lokomotivy, počet vozů, rychlost pojezdu, zjevné vady). Další podmínky nastavení vychází z platných norem a předpisů.

Metodika doporučuje současně s vyhodnocenými tabulkami a grafy uchovávat naměřená data v podobě, jak byla změřena pro možné další využití a vyhodnocení.

Data tak mohou být použita k pozdějšímu vyhodnocení dle nejnovějších matematických postupů. Metodika doporučuje data uchovávat ve formátu txt, aby bylo možné je snadno načíst do vyhodnocovacích softwarů. Příklad doporučených datových struktur je uveden na obrázku Obr. 3 a Obr. 4.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
1	Data info																					
2	File name: D:\Data\Data_6_4_2012\4_Os_2012_04_06_122339_Ch.dsd																					
3	Start time: 6.4.2012 19:23																					
4	Number of channels: 17																					
5	Sample rate: 10000																					
6	Store type: vždy rychle																					
7	Global header information:																					
8	Komentář:																					
9																						
10	Events																					
11	Event Type	Event	Time	Comment																		
12	1	Ukládání spuštěno	0																			
13	2	Ukládání ukončeno	14.5854																			
14																						
15																						
16	Data1																					
17	t	S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	A0Z	A1Z	A2Z	A3Z	A4Z	A5Z	A6Z	A7Z	A8Z	T0	T1	T2	T3
18	s	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	m/s ²	m/s ²	m/s ²	m/s ²	m/s ²	m/s ²	m/s ²	m/s ²	m/s ²	um/m	um/m	um/m	um/m
19	0	-0.01359509	0.02052082	0.0048348	0.0118263	0.00713896	0.00266131	0.00042264	0.01137915	0.1157047	0.52928078	0.48712251	0.18987501	-0.15002508	0.65156776	2.0363588	-1.5744308	2.6964497	-0.00226	-0.00199	-0.00201	-0.00271
20	0.0001	-0.013431445	0.02051359	0.00495687	0.0118258	0.00705001	0.00281812	0.00052945	0.01154308	-0.028647	0.36186111	0.32896316	0.17887834	1.6256675	0.07046282	1.1421592	-1.9231256	2.5882925	-0.00112	-0.00083	-0.00035	-0.0006
21	0.0002	-0.013324629	0.02024294	0.0049878	0.01165493	0.00691471	0.00268621	0.00049752	0.01166425	-0.1051126	0.16425024	0.44272545	0.09364501	2.4900706	-0.60616934	0.68795955	-2.1672807	2.1439517	0.001658	0.002529	0.003233	0.003373
22	0.0003	-0.013103774	0.02013093	0.00493097	0.01154089	0.00656877	0.0027611	0.00051881	0.01176403	-0.25886055	0.05806086	0.53428918	-0.01807998	1.7252928	-0.12589347	1.384806	-2.1115725	1.4588938	-0.00065	-0.00013	0.000132	-6.34E-05
23	0.0004	-0.012961416	0.02018592	0.00491311	0.01144413	0.00659005	0.00265048	0.00058305	0.01178902	-0.33358994	0.03330604	0.18745388	0.05240751	0.95465231	-0.70434523	1.9483607	-1.7972652	0.89265066	-0.00154	-0.00101	-0.00104	-0.00133
24	0.0005	-0.012804803	0.02012548	0.00482416	0.01137706	0.00646537	0.00272537	0.0006222	0.01176403	-0.3785712	0.2809104	0.00154753	0.16512793	0.95758367	-1.1766616	1.0484803	-1.3247741	0.45051971	-0.00205	-0.00239	-0.00229	-0.00255
25	0.0006	-0.012719464	0.02004376	0.00479926	-0.011313	0.00627303	0.0027075	0.00057963	0.01173562	-0.40487736	-0.10746686	-0.12608694	0.27235457	1.4205642	-0.53963134	-0.9756376	-0.6872004	0.03014462	-0.00107	-0.00046	-0.00032	-0.0005

Obr. 3 Vzorová datová struktura pro oblast srdcovky

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	Data info															
2	File name: D:\Data\Data_6_4_2012\4_Os_2012_04_06_122339_Ch.dsd															
3	Start time: 6.4.2012 19:23															
4	Number of channels: 15															
5	Sample rate: 10000															
6	Store type: vždy rychle															
7	Global header information:															
8	Komentář:															
9																
10	Events															
11	Event Type	Event	Time	Comment												
12	1	Ukládání spuštěno	0													
13	2	Ukládání ukončeno	14.5854													
14																
15																
16	Data1															
17	t	S0	S1	S2	S3	S4	A0Z	A1Z	A2Z	A3Z	A4Z	A5Z	A6Z	A7Z	A8Z	A9Z
18	s	mm	mm	mm	mm	mm	m/s ²	m/s ²	m/s ²	m/s ²	m/s ²	m/s ²	m/s ²	m/s ²	m/s ²	m/s ²
19	0	0,000291639	0,016461438	0,000643602	0,002195949	0,001547531	-0,002260376	0,030612793	-0,002918783	0,033202186	0,041913953	0,00190833	-0,011080912	-0,029788991	0,025642207	0,007981672
20	0,0001	0,000312927	0,016440149	0,000686556	0,002206592	0,001511799	-0,00044151	0,06427443	-0,027607698	0,005786471	0,11215014	0,045577362	0,003319241	0,036245018	0,002978919	-0,005881662
21	0,0002	0,000320149	0,016415251	0,000658047	0,002252968	0,001526244	-0,001047779	0,034820206	-0,023492878	-0,005177987	-0,03674477	-0,069937222	0,013399349	-0,013281634	0,013280517	0,005209005
22	0,0003	0,000198888	0,016340366	0,000650824	0,002238523	0,00154411	-0,000298838	0,058585607	0,009425675	0,060613327	0,005396007	-0,000909557	0,017719394	-0,002275966	-0,012128795	-0,005881662
23	0,0004	0,000287838	0,016479302	0,000718487	0,002202791	0,001597328	-0,001083477	-0,001644816	-0,03035091	0,085285641	-0,0732674	-0,002319673	-0,034121159	-0,011906212	0,000918828	-0,012812751
24	0,0005	0,000302283	0,01626187	0,000629537	0,002370427	0,001465423	-0,001226149	0,012381452	0,003939249	0,019494329	0,005396007	-0,03190162	0,069559947	-0,020161036	-0,012815873	-0,007267417
25	0,0006	0,000348659	0,01626187	0,000572518	0,002252968	0,001394339	-0,002010729	-0,015671084	0,025884952	-0,065487072	-0,017081259	0,049803019	-0,012520928	-0,04079695	0,020834947	-0,007267417

Obr. 4 Vzorová datová struktura pro oblast výměny

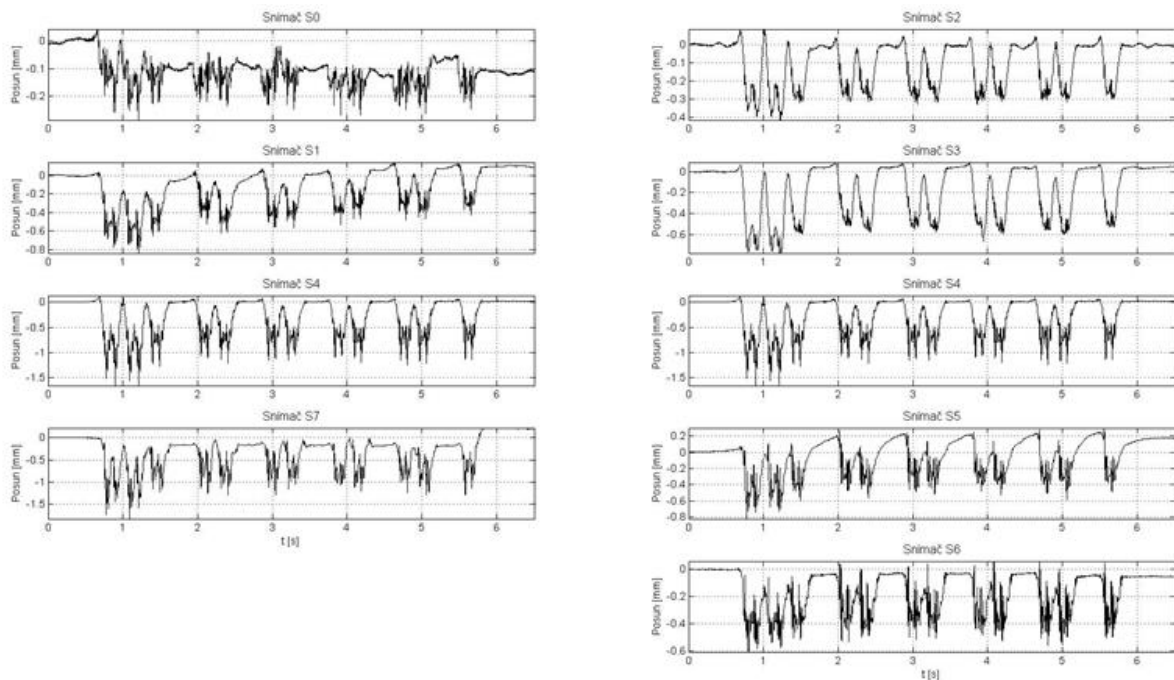
4.7 Příklady analýzy

V této části jsou uvedeny doporučené grafové výstupy pro jednotlivé oblasti výhybky i typy snímačů. Na Obr. 5 jsou uvedeny grafy svislých posunů pro oblast srdcovky. Výstupem naměřených dat je 9 grafů, kdy na levé straně stránky jsou 4 grafy snímačů, které byly vloženy podélně s osou hlavní větve, tudíž sledovaly průběh měnících se svislých posunů při projetí soupravy ve směru kolmém na pražec pod srdcovkou, a dále pak na pravé straně jsou vloženy grafy, které popisují průběh posunů v ose pražce pod srdcovkou. Takovéto rozložení grafů zpřehledňuje analýzu pohybového chování v oblasti srdcovky.

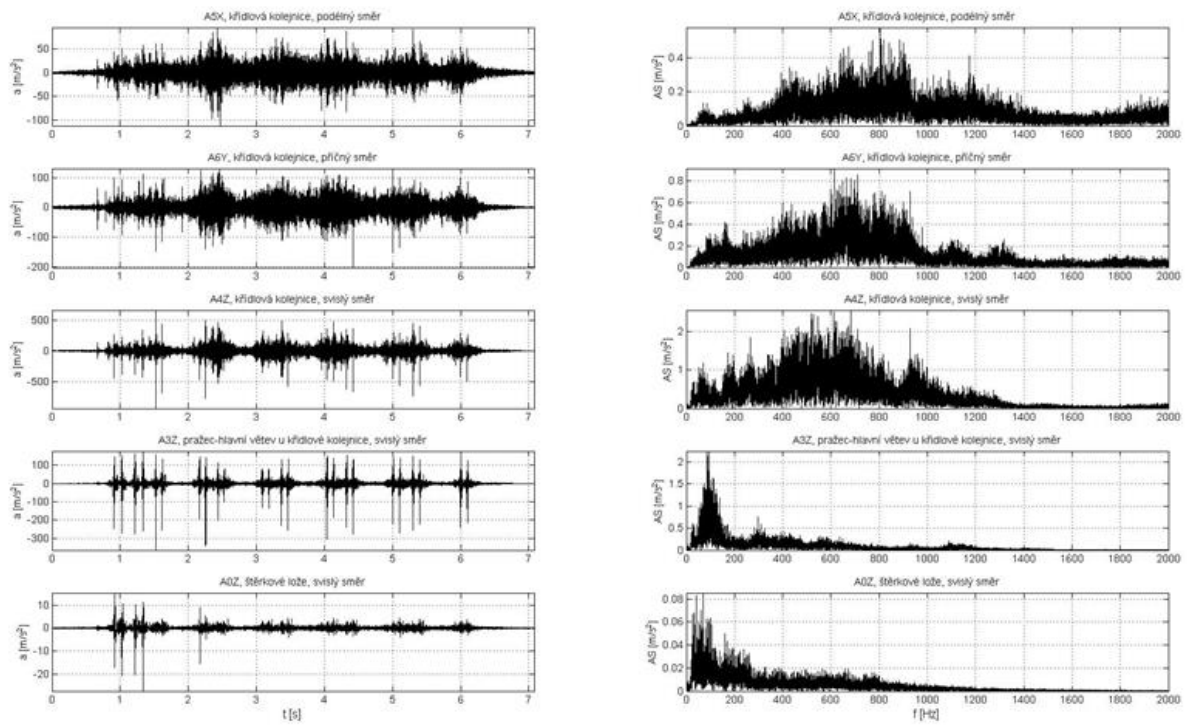
Podobným způsobem jsou seskládány grafy pro analýzu vibrací v oblasti srdcovky. Výstupy z každého snímače jsou rozděleny do dvou grafů. V levé straně obrázku jsou uvedeny časové průběhy zrychlení kmitání. V pravé části jsou uvedena jejich amplitudové spektra vypočítaná aplikací Fourierovy transformace. Grafy na Obr. 6 ukazují přenos vibrací od zdroje, tedy od křídlové kolejnice přes pražec až ke šterkovému loži. Na Obr. 7 pak jsou další grafy ukazující analýzu dat ze snímačů zrychlení umístěných na pražci pod srdcovkou. Na Obr. 8 je uveden vzorový grafický výstup pro tenzometr T0.

Podobně jsou doporučeny výstupy do grafů pro snímače v oblasti výměny. Tyto jsou uvedeny pro snímače posunů v Obr. 9.

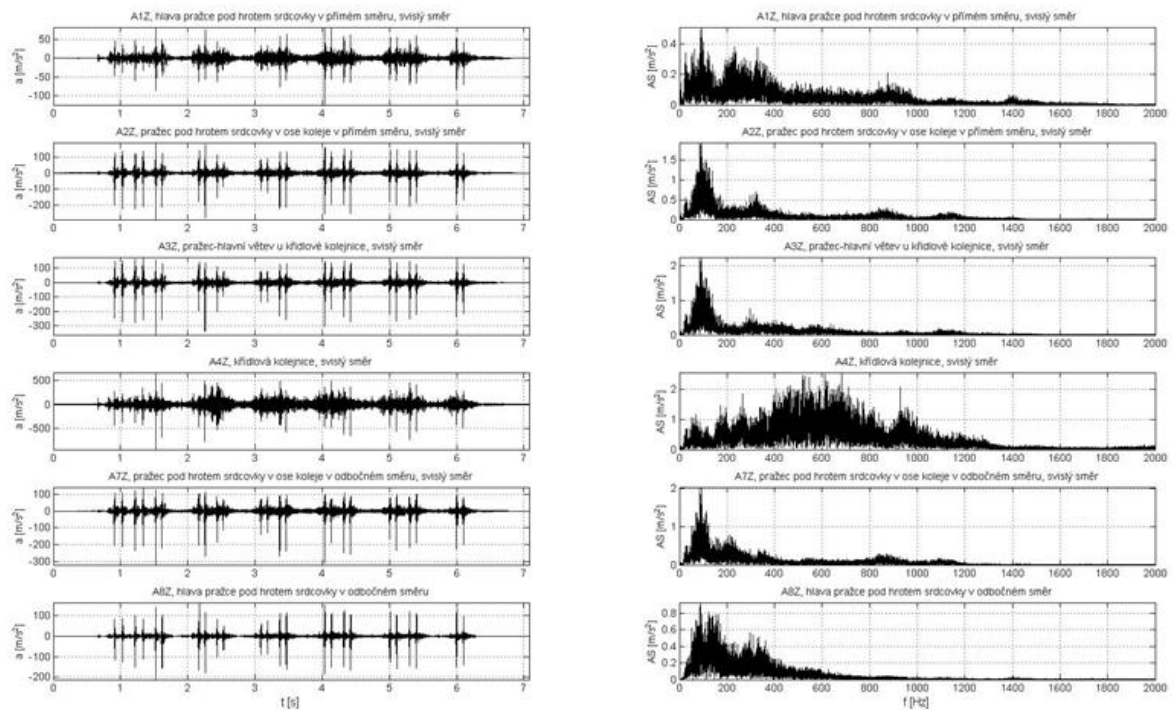
Obrázky Obr. 10 a Obr. 11 ukazují grafické výstupy pro snímače vibrací a pro oblast výměny.



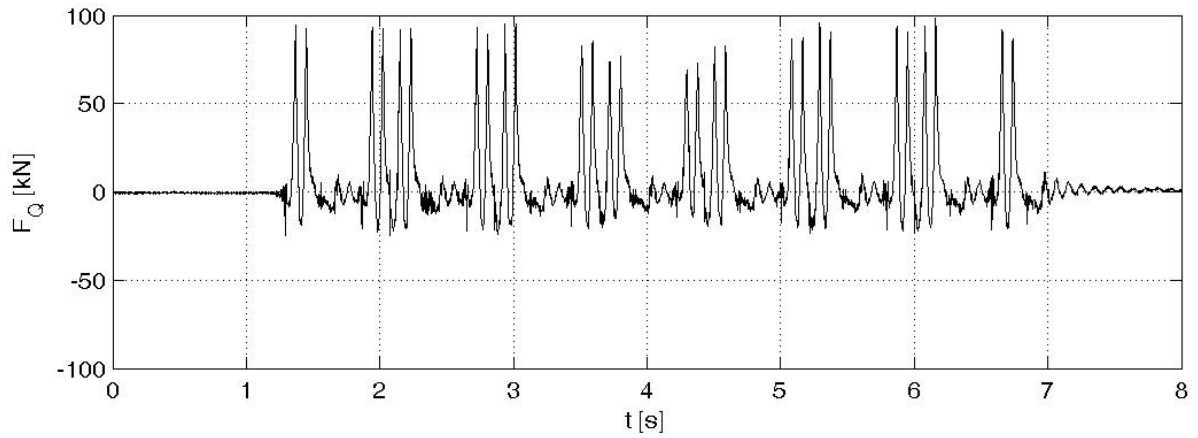
Obr. 5 Vzor grafů posunů v srdcovkové části



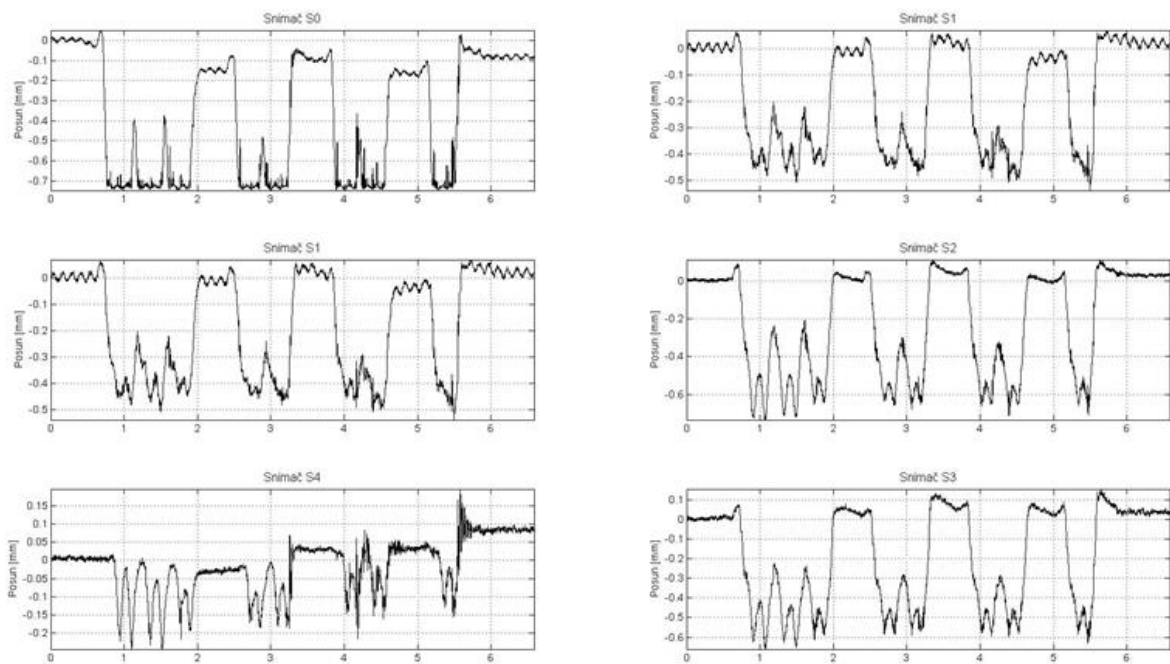
Obr. 6 Vzor grafů vibrací v srdcovkové části, první část



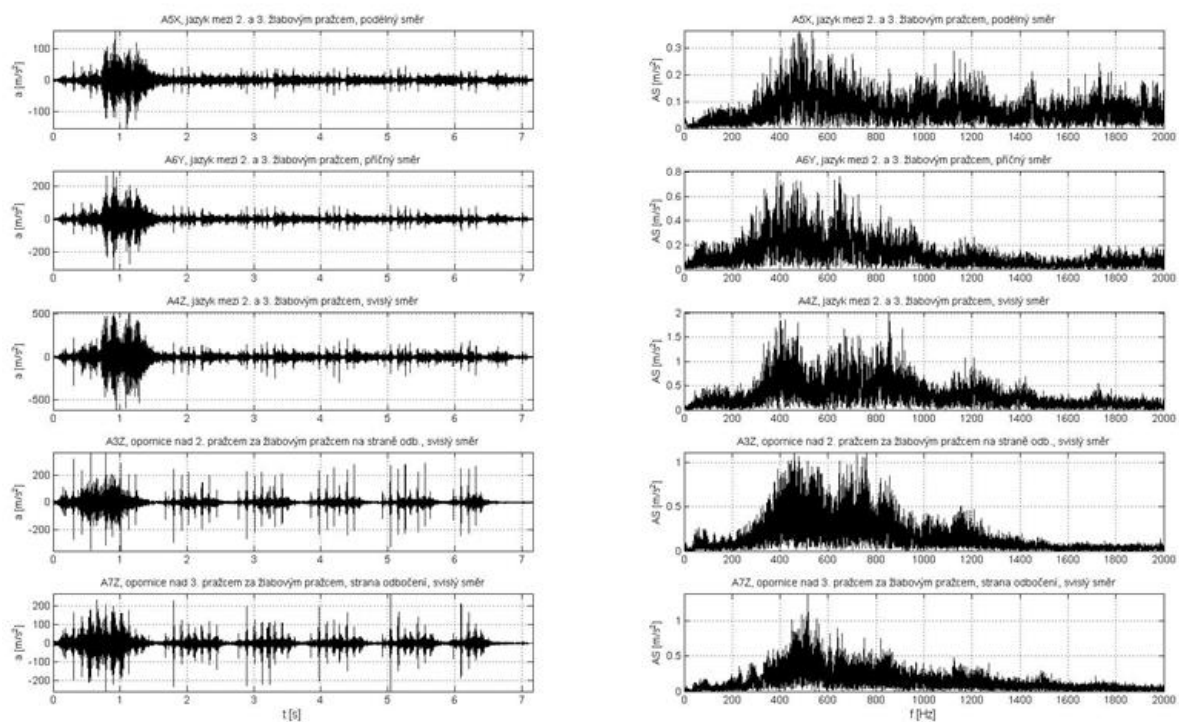
Obr. 7 Vzor grafů vibrací v srdcovkové části, druhá část



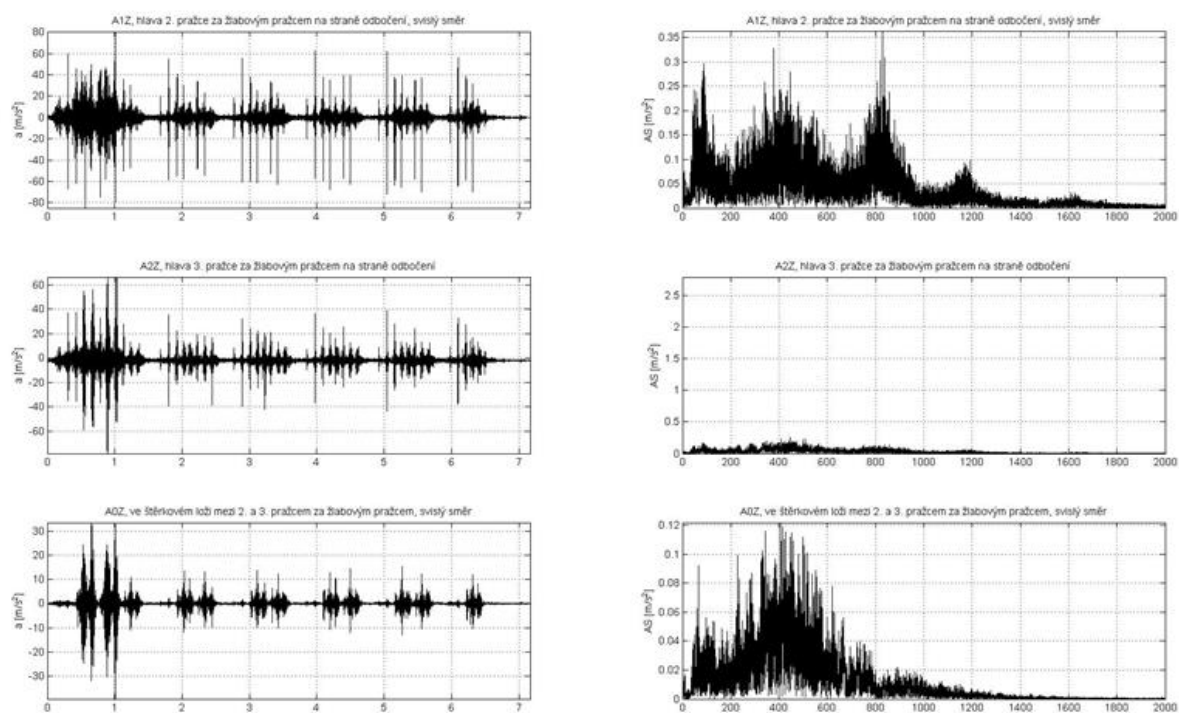
Obr. 8 Vzor grafů svislých kolových sil, tenzometr T0



Obr. 9 Vzor grafů posunů ve výměňové části



Obr. 10 Vzor grafů vibrací ve výměnové části, první část



Obr. 11 Vzor grafů vibrací ve výměnové, druhá část

5 Srovnání novosti postupů

Jde o komplexní metodiku analýzy dynamických účinků od železniční dopravy působících na výhybkové konstrukce se zahrnutím pohybového chování vybraných částí a šíření vibrační konstrukcí. V současné době obdobná metodika není k dispozici, výzkumná a vývojová pracoviště využívají velmi zjednodušená řešení. Dosud nebyl podán ucelený systém hodnocení dynamických účinků od kolejové dopravy působících na výhybky pro celý zmíněný proces. Neexistují dokonce ani metodiky pro jednotlivé fáze systému hodnocení.

Z tohoto důvodu měření a výzkumné práce neposkytují ucelenou soustavu informací a nejsou vzájemně srovnatelné. Podotkněme, že dosažené výsledky byly publikovány v odborných časopisech, na odborných konferencích a použity v diplomových a disertačních pracích.

6 Popis uplatnění certifikované metodiky

Metodika je určena třem skupinám uživatelů. Do první náleží vědecká a vzdělávací pracoviště zabývající se problematikou železničních konstrukcí, zejména pak technické univerzity. Výsledky jsou používány při měření dynamických účinků od železniční dopravy na výhybky a výhybkové konstrukce v rámci grantových projektů i další vědecké činnosti. Výstupy z metodiky umožňují srovnání stávajících i nových konstrukcí. Poskytnou důležité charakteristiky pro vývoj a srovnání nových progresivních řešení. Zároveň poskytne vstupy do matematických modelů, případně jejich kalibraci.

Druhou skupinou potenciálních uživatelů představují vlastníci resp. správci železniční infrastruktury v ČR i zahraničí. Předmětná metodika poskytne údaje o dynamických parametrech jednotlivých řešení k sestavení expertní databáze.

Třetím potenciálním uživatelem jsou výrobci a společnosti provádějící zakázková měření pro vývojová pracoviště a správce tratí. Těm poskytne detailní návod na realizaci měření a jejich analýzu. Každé pracoviště, které použije certifikovanou metodiku, bude mít jistotu, že při jejím dodržení budou získané výsledky průkazné, opakovatelné a srovnatelné.

7 Ekonomické aspekty

Na sestavení metodiky hodnocení dynamických účinků od kolejové dopravy působících na výhybky mají zájem výrobci, správci drážních staveb, vývojová pracoviště i další kooperující firmy. Předmětná metodika poskytne údaje o dynamických parametrech jednotlivých řešení vhodné k sestavení databáze konstrukčních řešení. Zároveň metodika

poskytne důležité informace o dynamických dějích a tak se sníží náklady na vývoj nových konstrukčních řešení. Jejich znalost také umožní optimalizaci údržbových prací. Všechny tyto skutečnosti tak logicky povedou ke snížení nákladů na provoz a údržbu.

8 Seznam použité literatury

- 1) ČSN ISO 16063-11, Metody kalibrace snímačů vibrací a rázů
- 2) ČSN ISO 5348, Vibrace a rázy – mechanické připevnění akcelerometrů
- 3) ČSN ISO 4866, Vibrace a rázy – Pokyny pro měření vibrací a hodnocení jejich účinků na konstrukce
- 4) ČSN ISO 2041, Vibrace a rázy a monitorování stavu
- 5) ČSN ISO 18431-1, Vibrace a rázy – zpracování signálů
- 6) ČSN ISO 18431-4, Vibrace a rázy – zpracování signálů, část 4 zpracování spektra rázové odezvy
- 7) ČSN ISO 10815, Vibrace měření vibrací generovaných uvnitř tunelů při průjezdu vlaků
- 8) ČSN EN 13481-7, Železniční aplikace - Kolej - Požadavky na vlastnosti systémů upevnění - Část 7: Speciální systémy upevnění pro výhybky a výhybkové konstrukce a přídržné kolejnice
- 9) ČSN EN 13232-1, Železniční aplikace - Kolej - Výhybky a výhybkové konstrukce - Část 1: Definice
- 10) ČSN EN 13232-6+A1, Železniční aplikace - Kolej - Výhybky a výhybkové konstrukce - Část 6: Pevné jednoduché a dvojité srdcovky
- 11) ČSN EN 13232-5+A1, Železniční aplikace - Kolej - Výhybky a výhybkové konstrukce - Část 5: Výměny
- 12) ČSN EN 13232-3+A1, Železniční aplikace - Kolej - Výhybky a výhybkové konstrukce - Část 3: Požadavky na interakci kolo/kolejnice

9 Seznam publikací, výstupy z originální práce

- 1) SMUTNÝ, J.; VUKUŠIČ, I.; TOMANDL, V.; PAZDERA, L.; SADLEKOVÁ, D., Analýza dynamických účinků v srdcovkové části výhybek, článek v Stavební obzor, ISSN 1210-4027, STAVEBNÍ OBZOR, Thákurova 7, 166 29 Praha 6, Praha, 2013
- 2) SMUTNÝ, J.; PAZDERA, L., The experimental analysis of dynamic processes related to railway transport, monograph, ISBN 978-80-7204-827-4, AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, Brno, 2012

- 3) SMUTNÝ, J.; PAZDERA, L.; VUKUŠIČ, I.; TOMANDL, V., Metodika měření dynamických účinků v srdcovkové části výhybek, článek v Nová železniční technika, ISSN 1210-3942, KPM Consult a.s., Brno, 2012

Uzavřené smluvní vztahy o využití výsledků

1. Rámcová smlouva o provozním ověřování výhybek, výhybkových konstrukcí, jejich částí a součástí č.j. S15245/11 – OTH,
2. Smlouva o vzájemném poskytování technické dokumentace č.j. S49265/08 – OTH,
3. Smlouva o sledování č.j. S3267/11 – OTH.
4. Smlouva o měření a zjišťování na železniční dopravní cestě v rámci expertní a výzkumné činnosti VUT FAST

Poděkování

Metodika vznikla v rámci řešení projektu TA01031297, Zvýšení kvality jízdní dráhy ve výhybkách pomocí zpružnění Technologické agentury České republiky