CERTIFIKOVANÁ METODIKA

MĚŘENÍ SKLUZOVÝCH VLN NA ŽELEZNIČNÍCH A TRAMVAJOVÝCH TRATÍCH

Autoři: Valehrach, J.[1], Plášek, O.[2] a Smutný, J.[3]

Certifikovaná metodika je výstupem projektu TE01020168 „Centrum pro efektivní a udržitelnou dopravní infrastrukturu“.

[1] Ing. Jan Valehrach, Ústav železničních konstrukcí a staveb, Fakulta stavební VUT v Brně, Veveří 95, Brno
[2] doc. Ing. Otto Plášek, Ph.D., Ústav železničních konstrukcí a staveb, Fakulta stavební VUT v Brně, Veveří 95, Brno
[3] prof. Ing. Jaroslav Smutný, Ph.D., Ústav železničních konstrukcí a staveb, Fakulta stavební VUT v Brně, Veveří 95, Brno

Obsah

Úvod ... 3
Seznam symbolů ... 3
Seznam zkratek ... 4
1. Cíl metodiky ... 5
2. Popis metodiky ... 5
2.1. Teoretické základy spojené s rozvojem vlnovitých deformací pojížděné plochy kolejnice ... 5
2.1.1. Charakteristika vlnovitých deformací ... 5
2.1.2. Další parametry ovlivňující rozvoj vad ... 7
2.2. Měření parametrů vlnovitých deformací a dalších souvisejících parametrů ... 8
2.2.1. Měření vlnovitých deformací ... 8
2.2.2. Evidence úseků ... 12
2.2.3. Měření související parametrů ... 12
2.3. Zpracování měřených dat ... 14
2.3.1. Úvod ... 14
2.3.2. Vlnovité deformace ... 14
2.3.3. Sledování souvisejících parametrů ... 16
2.3.4. Výpočet váženého I, E ... 17
2.4. Vyhodnocení ... 17
2.4.1. Vzájemné porovnávání jednotlivých měřících míst ... 17
2.4.2. Sledování rozvoje skluzových vln ... 17
2.4.3. Kombinace ... 17
3. Novost postupů a zdůvodnění metodiky ... 18
4. Popis uplatnění certifikované metodiky ... 18
5. Ekonomické aspekty ... 18
6. Seznam použité literatury ... 19
7. Seznam publikací, které předcházely metodice ... 19

Úvod

V současnosti správce tratí shromažďuje data z jednotlivých měření z kontrolních jízd, avšak samotná predikce rozvoje skluzových vln probíhá nejčastěji dle vlastní zkušenosti a mnohdy ne zcela podložených pozorování jednotlivých správců příslušných traťových úseků.

Dnes se jednotlivá místa posuzují individuálně na základě lokálních vstupních dat. Metodika stanoví komplexní univerzální postup pro všechny kategorie drah, typy tratí a konstrukce svršků tratí se zahrnutím všech známých faktorů, rozvoj vlnovitých vad ovlivňujících.

Seznam symbolů

a	rozdíly po sobě jdoucích vrcholů amplitud
d	délka oblouku odpovídající středovému úhlu Ψ
d_1	vzdálenost, kterou urazí vnitřním kolo při jízdě obloukem
d_2	vzdálenost, kterou urazí vnější kolo při jízdě obloukem
D	převýšení koleje
E	přebytek převýšení
E_v	vážený přebytek převýšení
F_0	jmenovitá kolová síla
G	modul pružnosti ve smyku
I	nedostatek převýšení
I_v	vážený přebytek převýšení
I_p	polární moment setrvačnosti
L	délka výpočtového okénka
$L_{e,p}$	délka vyhodnocovaného úseku
L_m	délka změřené úseku
m	hmotnost soupravy
r	jmenovitý poloměr kol dvojkolí
R	poloměr oblouku
R_{krit}	kritický poloměr
R_{eff}	efektivní poloměr
r_1	okamžitý poloměr vnitřního kola dvojkolí
r_2	okamžitý poloměr vnějšího kola dvojkolí
s	vzdálenost styčných kružnic
u	rozchod koleje

V	rychlost
y	hodnota signálu
Δy	příčné posunutí dvojkolí v koleji
γ	kuželovitost jízdního obrysu
λ	délka vlny
λ_p	délka nejdelší vlny daného vlnového pásma
μ	koeficient tření
φ_1	úhel pootočení vnitřního kola
φ_2	úhel pootočení vnějšího kola
$\Delta\varphi$	rozdíl úhlů pootočení kola
ψ	středový úhel

Seznam zkratek

AVV	Automatické vedení vlaku
ČD	České dráhy, a.s.
ČSN	Česká technická norma
EN	Evropská norma
ETCS	vlakový zabezpečovací systém (European Train Control System)
PP	Peak to Peak
RMS	Root mean square
SŽDC	Správa železniční dopravní cesty, státní organizace
TÚDC	Technická ústředna dopravní cesty
UIC	Mezinárodní železniční unie

1. Cíl metodiky

Metodika je určena pro účely výzkumné činnosti v oblasti vlnovitých deformací pojížděných ploch kolejnic Vignolových a žlábkových se zaměřením na skluzové vlny. Cílem metodiky je stanovení postupů měření těchto vad a vyhodnocení získaných dat tak, aby bylo možné identifikovat rozhodující faktory rozvoje vad, možné určit rizikové lokality a predikovat rozvoj vad. Za tímto účelem metodika stanovuje vstupní parametry, míru jejich vlivu a následné vyhodnocení.

Norma ČSN EN 13231-3 [1] specifikuje požadavky a potřebná měření, avšak pouze pro přejímku v oblasti reprofilace hlav Vignolových a žlábkových kolejnic v podélném a/nebo příčném směru. Dlouhodobé sledování úseků provádí TÚDC SŽDC, kde výstupní formát dat se jeví jako nevhodný k dalšímu zpracování pro výzkumné účely, neboť dnes pouze sledovaný plovoucí průměr PP a procentuální překročení hodnot PP (mnohdy na dlouhém úseku) nemusí zohledňovat rozvoj vady pro konkrétní úsek bez dalších souvislostí a vývoj v čase. Pro účely správce kolejové infrastruktury je hodnocení vlnovitých vad uvedeno v SŽDC SR103/4(S) [2].

2. Popis metodiky

2.1. Teoretické základy spojené s rozvojem vlnovitých deformací pojížděné plochy kolejnice

2.1.1. Charakteristika vlnovitých deformací

Úvod

Předpis SŽDC (ČD) S 67 Vady a lomy kolejnic [3] rozděluje vlnovité deformace na

- 2201 D Vlnkovitost kolejnice a skluzové vlny
- 2202 D (C) Vlnovitá deformace (dlouhé vlny)

a obdobně pak předpis UIC 712 Rail defects [4]

- 2201 Short-pitch corrugation
- 2202 Long-pitch corrugation.

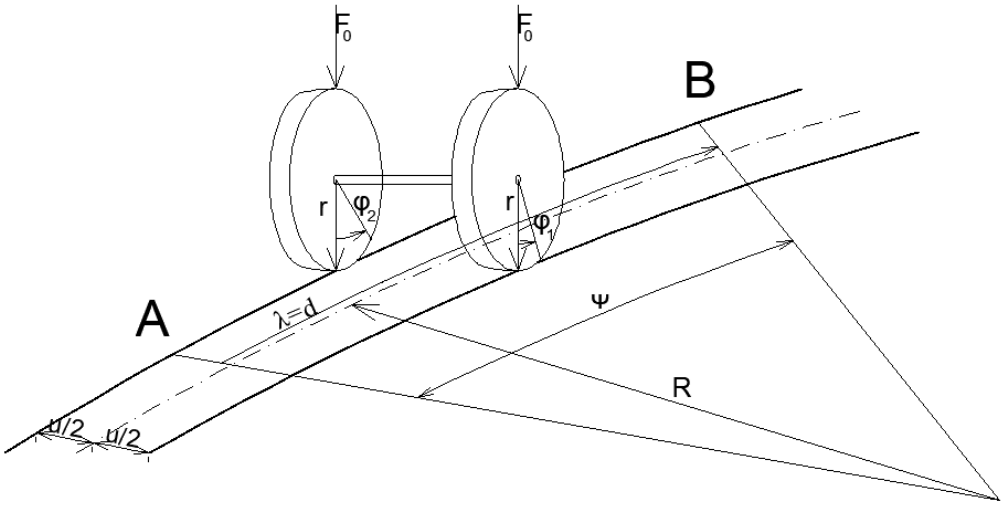
Skluzové vlny

Dle Funkeho [5] *„skluzové vlny, častěji také krátké vlny, jsou vlnovité nerovnosti na pojížděné ploše, jejichž vyvýšeniny mají rozteč mezi 8 a 30 cm. Jejich hloubka se pohybuje mezi 0,1 a 1,2 mm. Vyvýšeniny i prohlubně vypadají stejnoměrně světle. Vyskytují se hlavně na vnitřním kolejnicovém pásu směrových oblouků.“*[5] Jiné zdroje [1], [6] uvádějí vlnovou délku pro skluzové vlny 10 až 30 cm. Je proto důležité pečlivě vybírat úseky se skluzovými vlnami, aby nedošlo k záměně s vlnkovitostí [6], někdy označovanou jako vlnky [5] s odlišnými příčinami a místy vzniku. Ke správnému výběru zájmových míst je potřebné znát mechanismus vzniku skluzových vln

Ve zjednodušené teorii průjezdu vozidla obloukem jsou následující předpoklady:

- kuželovitost jízdního obrysu;
- svislé síly F_0 působící na vnitřní a vnější kolo dvojkolí jsou shodné;
- kola jsou s nápravou pevně spojena;
- zjednodušený model nápravy.

Při jízdě obloukem z místa A do místa B (viz obr. 1) musí urazit vnitřní a vnější kolo dvojkolí rozdílnou vzdálenost.



Obr. 1. *Geometrie a síly působící na dvojkolí*

Tyto rozdílné vzdálenosti (d_1, d_2) by za předpokladu, že kola nejsou pevně spojena v dvojkolí nápravou, odpovídaly rozdílným úhlům pootočení kol φ_1aφ_2.

$$d_1 = r.\varphi_1 \quad [\text{m}] \quad (1)$$

$$d_2 = r.\varphi_2 \quad [\text{m}] \quad (2)$$

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \Delta\varphi \quad [\text{rad}] \quad (3)$$

Vzdálenosti ujeté koly můžeme získat i ze středového úhlu a poloměru oblouku:

$$d_1 = \left(R - \frac{u}{2}\right)\Psi \quad [\text{m}] \quad (4)$$

$$d_2 = \left(R + \frac{u}{2}\right)\Psi \quad [\text{m}] \quad (5)$$

Logicky platí tedy i vztah

$$d = R.\Psi \quad [\text{m}] \quad (6)$$

Kombinací výše uvedených informací dostaneme vztah

$$\Psi = \frac{r}{u}\Delta\varphi \quad [\text{rad}] \quad (7)$$

Dále je nutné zohlednit vliv vozidla. Do hry vstupují veličiny jako třecí síla ve styku kolo-kolejnice, tuhost nápravy, pevnost vedení dvojkolí, které ovlivňuje polohu dvojkolí v koleji atd. Především skutečnost, že kola u skutečného vlaku jsou pevně spojena nápravou v dvojkolí, způsobí pootočení obou kol o stejný úhel, čímž dojde ke skluzu vnitřního kola. Vše se uskuteční na délce dráhy *d*, která tedy odpovídá délce skluzové vlny. Po zapracování parametrů vozidla dostaneme vztah pro výpočet délky skluzové vlny

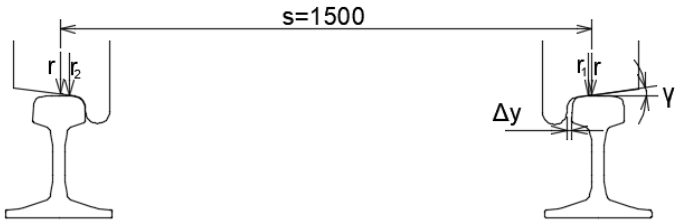
$$\lambda = d = \left(\frac{r^2 \mu F_0}{G I_p}\right).R \quad [\text{m}] \quad (8)$$

kde v závorce máme vliv vozidla a za ní vliv infrastruktury, prozatím zastoupený pouze poloměrem oblouku.

V této zjednodušené teorii infrastruktura do výpočtu vstupuje pouze jako poloměr oblouku a z výše uvedené rovnice vyplývá, že délka vlny je závislá na poloměru oblouku

$$\lambda = \mathrm{f}(R) \quad [\text{m}] \quad (9)$$

Je také potřeba zohlednit polohu dvojkolí v koleji.



Obr. 2. *Dvojkolí*

Pojede-li dvojkolí obloukem o poloměru menším než je kritický poloměr R_{krit}, obě kola se pootočí o shodný úhel φ, ale každé kolo urazí jinou vzdálenost – dochází k prokluzu vnitřního kola.

Kritický poloměr nám zohledňuje parametry železničního dvojkolí a jeho polohu v koleji.

$$R_{krit} = r\frac{u}{\gamma\Delta y} \quad [\text{m}] \tag{10}$$

Nyní logicky, bude-li poloměr R menší než R_{krit}, měly by se v oblouku vyskytnout skluzové vlny. Z praxe však víme, že se vlny objevují v obloucích o menších poloměrech než dle výše uvedené teorie. Je proto nutné zavést další veličinu – efektivní poloměr R_{eff}, pro který platí

$$R_{eff} = \frac{1}{\frac{1}{\mathrm{R}} - \frac{1}{R_{krit}}} \quad [\text{m}] \tag{11}$$

Kritický poloměr R_{krit} = 750 m pro kolo s konicitou γ 1:20 (efektivní poloměr R_{eff} = 750 m) odpovídá poloměru oblouku R= 375 m.

Kritický poloměr R_{krit} = 1500 m pro kolo s konicitou γ 1:40 (efektivní poloměr R_{eff} = 1500 m) odpovídá poloměru oblouku R= 750 m => Skluzové vlny se vyskytují v obloucích pod cca 700 m.

Vlnkovitost

„Vlnky se vyznačují téměř pravidelnými, za sebou následujícími lesklými vlnovitými vyvýšeninami a tmavými vlnovými prohlubněmi na pojížděné ploše. Vzdálenost vyvýšenin je asi 3 až 8 cm, hloubka vlnek je 0,1 – 1,2 mm.“ [5]

Vlnkovitost [6], někdy označovaná jako vlnky [5] se od skluzových vln liší odlišnými příčinami a místy vzniku. Vzhledem ke skutečnosti, že vlnové délky obou vad mohou být shodné, je nutné znát příčinu vzniku a s tím související místa výskytu jednotlivých vad.

„Vlnkovitost nacházíme převážně v přímých úsecích a obloucích velkých poloměrů současně na obou kolejnicových pasech. Vzniká prakticky na všech druzích tratí, např. se smíšeným nebo jen nákladním provozem, na tratích s jednotnou skladbou vozů (městské, příměstské), v místech brždění a rozjezdů souprav atd.

Jejich vznik není zatím stále zcela známý, ale většina hypotéz vychází z předpokladů vibrační rezonance a plastických rázů, z nichž vznikají kontaktní rezonanční vibrace. Frekvence odpovídají délce vln.“ [7]

Vlnkovitost je možné dále dle [5] rozlišovat podle vzhledu vlnek.

2.1.2. Další parametry ovlivňující rozvoj vad

Parametry konstrukčního uspořádání koleje

Dle [8] *„Ke snížení účinků odstředivé síly má být v koleji v oblouku projektováno převýšení koleje, a to zvýšením polohy vnějšího kolejnicového pásu vůči pásu vnitřnímu, který zůstává v úrovni nivelety temene kolejnicového pásu.*

Teoretické převýšení D*eq je dáno takovým úhlem odklonu spojnice temen kolejnicových pásů od horizontální roviny, kdy výslednice svislého zrychlení vyvolaného gravitací a odstředivého zrychlení*

vyvolaného průjezdem vozidla s rychlostí V obloukem o poloměru R působí kolmo ke spojnici temen kolejnicových pásů. Tuto veličinu lze počítat dle vzorce:

$$D_{eq} = \frac{11{,}8.V^2}{R} \quad [\text{mm}] \quad (12)$$

Vlaky jedoucí rychlostí:

$$V > \sqrt{\frac{D.R}{11{,}8}} \quad [\text{km/h}] \quad (13)$$

projíždějí obloukem s nedostatkem převýšení I:

$$I = \frac{11{,}8.V^2}{R} - D > 0 \quad [\text{mm}] \quad (14)$$

V takovém případě dochází ke zvětšení zatížení vnějšího kolejnicového pásu nárůstem vodicí a svislé kolové síly.

Vlaky jedoucí rychlostí:

$$V < \sqrt{\frac{D.R}{11{,}8}} \quad [\text{km/h}] \quad (15)$$

projíždějí obloukem s přebytkem převýšení E:

$$E = D - \frac{11{,}8.V^2}{R} > 0 \quad [\text{mm}] \quad (16)$$

V takovém případě dochází ke zvětšení zatížení vnitřního kolejnicového pásu především nárůstem svislé kolové síly.

Dále norma [8] uvádí: Převýšení *„má dále zohledňovat hospodárnost údržby tak, aby opotřebení obou kolejnicových pásů vlivem zatížení provozem bylo pokud možno vyrovnané. V projektu je tedy třeba při návrhu velikosti převýšení zohlednit uvažovanou skladbu vlaků (četnost vlaků podle jejich rychlosti a hmotnosti).“*

Výsledkem návrhu je tedy pro daný poloměr převýšení, které pro danou kolej a charakter provozu na ní považuje projektant a správce za nejvhodnější. Vzhledem ke skutečnosti, že se rychlosti, skladba a hmotnost souprav, opotřebení dvojkolí (souhrnně provoz) v čase mění a převýšení je konstantní po dobu jednotek i desítek let, nemusí parametry oblouku vyhovovat aktuálnímu stavu. I v případě optimálního návrhu budou obloukem projíždět rozdílné soupravy rozdílnými rychlostmi, a tedy rozdílnými nedostatky převýšení, resp. přebytky převýšení neboli rozdílným vlivem na kolej.

S příchodem nových, plně či částečně autonomních provozů založených na systémech AVV, ETCS či jiných, lze předpokládat sjednocení rychlostí dle určitých kategorií, skladeb či jiných parametrů souprav (osobní x rychlíkové x nákladní, různých provozovatelů drážní dopravy atd.).

2.2. Měření parametrů vlnovitých deformací a dalších souvisejících parametrů

2.2.1. Měření vlnovitých deformací

Základní parametry pro sledování vlnovitých deformací pojížděné plochy kolejnice

Pro potřeby měření a sledování je vybráno rozdělní dle normy ČSN EN 13231-3 [1] s rozdělením na vlnová pásma:

- 10 ÷ 30 mm,
- 30 ÷ 100 mm,
- 100 ÷ 300 mm,
- 300 ÷ 1000 mm.

Z výše uvedeného jsou pro potřeby skluzových vln sledována především vlnová pásma 30 ÷ 100 mm a 100 ÷ 300 mm.

Měření podle této metodiky je možné pro všechna vlnová pásma, avšak přednostně se metodika zaměřuje na skluzové vlny.

Výběr sledované lokality

Skluzové vlny se vyskytují v obloucích o poloměrech menších než cca 700 m, avšak nejvíce se projevují v obloucích o poloměrech menších než 300 m.

Samotná měření by měla probíhat v kružnicové části oblouku z důvodu eliminace změn křivosti v oblasti přechodnic. Měření mohou zahrnovat také celý oblouk včetně přechodnic pro účely identifikace kritické směrové křivosti s ohledem na rozvoj skluzových vln, avšak toto musí být zaznamenáno a není možné při vyhodnocování porovnávat měření z kružnicových částí a oblasti přechodnic.

Začátek a konec úseku je vhodné volit podle pevných bodů v okolí trati, např. zajišťovacích značek (na patkách trakčního vedení) apod. Značky na kolejnicích či pražcích nejsou vhodné z důvodu měření před a po výměně kolejnic, možných údržbových zásahů apod.

Instrumentace měření

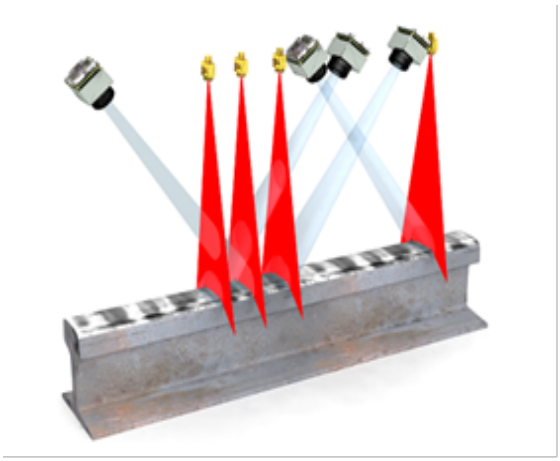
Metodika nepředepisuje měřící zařízení (aparaturu). Možno měřit:

- přímou metodou, při které příslušný snímač měří přímo povrch kolejnice:
  - kontaktně;
  - bezkontaktně;
- nepřímou metodou, při které jsou měřeny veličiny, jež jsou výsledkem interakce kola/kolejnice;

(obdobné rozdělení jako v ČSN EN 13231-3 [1]).

Vzhledem k výzkumnému zaměření metodiky je upřednostňována přímá metoda. Nepřímá metoda je vhodná pro určení a výběr měřičských lokalit.

Měřící zařízení musí splňovat požadavky dle kap 4.1 normy ČSN EN 13231-3 [1].



Obr. 3. *Příklad nejčastějšího způsobu měření – přímou bezkontaktní metodou: Systém používá pro měření na kolejnicovém pásu čtyři lasery a kamery vytvářející čtyři optické asymetrické tětivy. [6]*

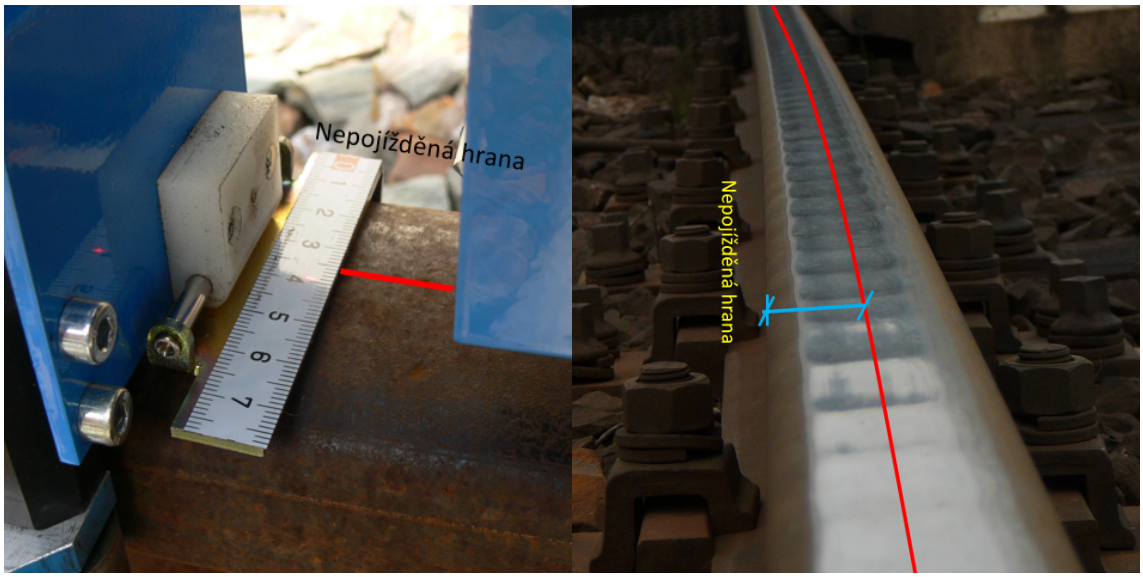
Samotné měření

Při práci v provozované koleji jsou pracovníci povinni dodržovat pravidla bezpečnosti práce příslušného správce, např. *Bp 1 Předpis o bezpečnosti a ochraně zdraví při práci* (pro tratě ve správě SŽDC).

Před samotným měřením musí být provedena vizuální prohlídka úseku a odstranění nežádoucích hrubých nečistot z hlav kolejnic. Výsledky vizuální prohlídky se zaznamenají do protokolu.

Při samotném měření je vhodné se vyvarovat izolovaným stykům, místům s vadami kolejnic, projetým svarům, mazníkům, místům s převalky apod. V případě měření přes tato místa je nutné provést úpravu signálu – „odstranění špiček“ dle ČSN EN 15610 [9].

Měření vlnovitých deformací (měřící profil) se provádí co nejblíže středu pojížděné plochy hlavy kolejnice. U každého měření musí být zaznamenána vzdálenost mezi nepojížděnou hranou hlavy kolejnice a měřícím profilem.



Obr. 4. *Umístění měřícího profilu (červeně) na pojížděné ploše hlavy kolejnice s ukázkou zaměření k nepojížděné hraně hlavy kolejnice*

V odůvodněných případech je možno v příčném řezu užít i jiný měřící profil, avšak tato měření nelze porovnávat s měřeními uprostřed pojížděné plochy hlavy kolejnice.

Maximální délka měřeného úseku není omezena. Minimální délka je stanovena na 10 m z důvodů dostatečného množství dat pro vlnové pásmo s vlnovými délka 300 ÷ 1000 mm

Největší krok měření je povolen 5 mm (pro vlnová pásma 30 ÷ 100 mm a 100 ÷ 300 mm). Doporučuje se však menší. Použitý krok měření je nutné vždy evidovat.

Měření vlnovitých deformací

Lokalita: Hády
Datum: 12.05.2017
Trať: 326 (Brno-Maloměřice St.6 - Česká Třebová), km 161.685 - 163.000
Měřil: Guziur
Zapisoval: Valehrach
Počasí: slunečno

Č. měření	kolej	kolejnice	od	do	Měř. profil	poznámka	soubor*
1211	1	levá	portál 2. tunelu jih	162,8 (55)	3.9	Sl.57-47,5m; obrus 69m	170512103311
1212	1	levá	162,8 (55)	LIS	3.9		170512103520
1213	1	levá	LIS	162.7	3.9	Sl.51-27,5m	170512104054
1214	1	levá	162.7	sl 49	3.9		170512104433
1215	1	levá	162.1		3.9	přerušeno	170512104847
1216	1	levá	162.1	162	3.9		170512111212
1217	1	levá	162	tunel 1. konec	3.9	pokráčování 1216 (překryv), 13m-162.0	170512111401
1218	1	levá	portál 1. tunelu sever	cca 2. výklenek	3.9		170512111755
1219	1	levá	tunelové rozhraní	portál 1. tunelu jih	3.9	9m-2. výklenek	170512112221
1220	1	levá	portál 1. tunelu jih	most konec	3.9		170512112743
1221	1	levá	162.1	tunel 1. konec	3.9	162,0-74m	170512113116
1222	1	levá	portál 1. tunelu jih		3.9	přerušeno	
1223	1	levá	portál 1. tunelu jih	sloup 3	3.9	7A-25,4m; 161,9-28,9m	170512114001
1224	1	levá	sloup 7	sloup 5A	3.9		170512114323
1225	2	levá	sloup 8	sloup 6A	3.9		170512115245

Poznámky: Sl.57-47,5m = u sloupu číslo 57 (v místě zajišťovací značky) byla měřícím zřízením ujeta vzdálenost 47,5 m
162,8 (55) = staničení (km 162,8 (sloup č. 55))
LIS = izolovaný styk (162.750)

Obr. 5. *Příklad měřičského protokolu. Měření č. 1215 a 1222 z příkladu byla předčasně ukončena např. z důvodu průjezdu vlaku po měřené koleji. Konec měření není uveden, neboť nebylo možno přiřadit žádný pevný bod. Měření č. 1215 přesto bylo uloženo a je možné jej pro částečné vyhodnocení využít, např. pro kontrolu opakovatelnosti měření s již řádně provedeným měřením č. 1216. Oproti tomu měření č. 1222 bylo příliš krátké a pro nemožnost dalšího zpracování nebylo měřícím zařízením uloženo.*

Jsou-li v měřičském protokolu na místě z praktických důvodů pevné body (od – do) popisovány zjednodušeně např. číslem sloupu místo staničením, je nutné přesné místo definovat (např. zajišťovací značku na patce sloupu (s uvedením konkrétního staničení).

Období sledování

Samotný monitoring zvoleného úseku by měl zahrnovat celý cyklus rozvoje vlnovitých deformací od vzniku, přes rozvoj až po odstranění vady.

Je-li možnost prvního měření po výměně/broušení kolejnic (či jiné technologii ovlivňující či měnící mikrogeometrii kolejnic – dále uváděno pouze jako výměna/broušení kolejnic), uskuteční se toto měření do 5 dnů po výše uvedeném zásahu pro možnost sledovat rozvoj z tzv. bezvadného stavu (výchozí stav „0“), případně pro možnost zaznamenat budoucí spouštěče rozvoje vln.

Jednotlivá cyklická měření se pak uskuteční po 3, 6, 9, 12, 18, 24, 36 měsících od výchozího stavu „0“ a dále nejvíce po 12 měsících. Další měření jsou nutná uskutečnit při údržbových a opravných pracích a při jakémkoliv zásahu do koleje.

Poslední měření by se mělo uskutečnit nejvíce 5 dnů před další výměnou/broušením kolejnic, tedy novým výchozím stavem „0“. Zde je nutno přihlédnou k případným přípravným pracím, jenž by mohly ovlivnit měření vlnovitých vad. V případě, že je cyklus mezi výchozími stavy „0“ delší než 5 let, je možné sledované období zkrátit na 5 let od posledního výchozího stavu „0“.

2.2.2. Evidence úseků

Staničení

Měření se provádějí mezi tzv. pevnými body, které nemění svoje umístění v prostoru a jsou svojí stálostí nezávislé na případných změnách v a na koleji, resp. kolejnicích samotných. Je-li to možné, je doporučeno každému pevnému bodu přiřadit i staničení konkrétní tratě. Je též doporučeno v evidenci úseků kromě pevných bodů (staničení) uvádět i čísla sloupů trakčního vedení přilehlých k zájmové koleji, mezi kterými bylo měření provedeno v pořadí dle směru měření (umožní kontrolu směru měření a slouží k jednodušší orientaci na místě měření).

U tramvajových tratí na samostatném či přidruženém tělese vzhledem k absenci staničení je uvedení čísel sloupů trakčního vedení nezbytností.

Kolej

Číslo sledované koleje je nutné uvádět na vícekolejných tratích (možno zjistit z pasportu tratě). U tramvajových tratí, není-li pasport k dispozici, je nutné číslo koleje zvolit (v příslušné dokumentaci a protokolu popsat u příslušné koleje směr jízdy tramvajových vlaků – např. kolej č. 1 „z centra města do Líšně“ apod.). Toto je vhodné u všech tratí.

Kolejnice a směr

Přestože se skluzové vlny vyskytují především na vnitřním kolejnicovém pasu, je vždy nutné uvádět, která kolejnice byla měřena (ve směru staničení) a směr měření, např. „levá – proti staničení“.

Měřící profil

Měřícím profilem je myšlena měřící stopa příslušného zařízení, ve které zaznamenává vlnovité deformace. Do protokolu se u každého měřeného úseku uvede umístění měřícího profilu.

Evidence zajímavých míst a činností

Během samotného měření se do protokolu mohou uvést i další staničení zájmových míst (např. monitorovací místo pro měření hluku), hektometry, trakční vedení apod.

Bezpodmínečně se uvede staničení jiných viditelných vad kolejnic, styků kolejnic/izolovaných styků, změny svršku či jen části svršku (např. upevňovadel), přechodů zářez/násep, začátku a konce mostů a tunelů, přejezdů.

Při průjezd vlaku po sousední koleji je nutné přerušit měření.

U každého měřeného místa je důležitá evidence údržbových prací či dalších činností a událostí, jenž byly na daném úseku provedeny a mohly by ovlivnit výsledky měření, zejména oprava GPK, výměna pražců, výměna upevňovatel, dotahování upevňovadel, zřízení BK apod.

2.2.3. Měření související parametrů

Přestože je možno množství parametrů vyčíst z dokumentace tratě, je důležité pro zpracování a vyhodnocení u každého úseku změřit skutečné hodnoty níže uvedených veličin po celé délce měřeného úseku.

Měření souvisejících parametrů, konkrétně převýšení a rozchodu koleje a směrových poměrů se řídí dle [10], [11] a [12], není-li uvedeno v této metodice jinak.

Převýšení koleje

V ideálním případě je v kružnicové části oblouku o poloměru *R* převýšení konstantní (vyjma některých případů definovaných v [8]). Provozem však může dojít k reálné změně převýšení. Převýšení koleje pro potřeby metodiky se provede nejméně na třech místech sledovaného úseku (mimo vzestupnice a jejich zaoblení) vzájemně vzdálených alespoň třetinu délky oblouku, při čemž jedno měření bude

uskutečněno ve středu délky oblouku. V případě dalších měření budou jednotlivé hodnoty v pravidelných vzdálenostech a vně i mezi výše uvedené tři měření.

Rozchod koleje

Pro potřeby metodiky platí pro měření stejný postup jako v případě Převýšení koleje.

Směrové poměry

Pro potřeby metodiky platí pro měření stejný postup jako v případě Převýšení koleje. V případě směrových poměrů se zjišťuje poloměr oblouku.

Měření rychlostí

Výběr místa pro měření rychlostí závisí na předpokladu stálosti či změny rychlostí projíždějících souprav. U oblouků s předpokládanou konstantní rychlostí jízdy vlaků, postačuje měření rychlosti uprostřed kružnicové části oblouku, nebo není-li to možné, co nejblíže tomuto místu. U oblouků s předpokládanou změnou rychlostí souprav, musí být měření provedeno na začátku a konci kružnicové části oblouku.

V případě oblouků s předpokládanými konstantními rychlostmi jízdy vlaků se doporučuje a v případě oblouků se změnami rychlostí je nutné mít více měření (měřících míst). Zároveň zajistit pro každou zaznamenanou rychlost na jednom místě i změření rychlosti na dalších místech pro tutéž soupravu (pro jeden vlak bude k dispozici sada rychlostí po délce oblouky – bude znám rychlostní profil vlaku v daném úseku).

Při měření rychlostí na téže trati a koleji se důrazně doporučuje provádět měření na několika místech ve stejném termínu a čase z důvodu zachycení rychlostí téže vlaku (se shodnými parametry jako hmotnost, konstrukce apod.).

Období sledování a samotný monitoring rychlostí by mělo zahrnovat několik provozních stavů dopravy (pracovní den, víkend, apod.).

Měření rychlosti nesmí probíhat během výluk (i částečných) a během snížené rychlosti v daném oblouku.

Skladba a hmotnosti souprav

Skladba a hmotnosti souprav se zjišťují pro soupravy, u kterých byly změřeny rychlosti dle předchozí kapitoly Měření rychlostí.

Skladbu a složení souprav je možno zaznamenat např. optickým záznamovým zařízením nebo zjistit, stejně jako hmotnosti, z jiných zdrojů (provozovatele souprav, správce tratí apod.).

Další parametry

Mezi další parametry patří např.:

- sklonové poměry
- skladba železničního svršku, kolejnice (tvar, materiál), podložka pod patu kolejnice, podpražcové podložky, štěrk, typ pražce, druh upevnění;
- základní vizuálně zjistitelné údaje o železničním spodku (zemní těleso – násep, zářez, mostní konstrukce apod.;
- údaje o počasí;
- případně další výše neuvedené faktory.

Tyto parametry slouží společně s evidencí úseků především k zaznamenání průběhu měření. Dále slouží k zohlednění délky sledovaného úseku a v případě, že se v daném úseku mění některý

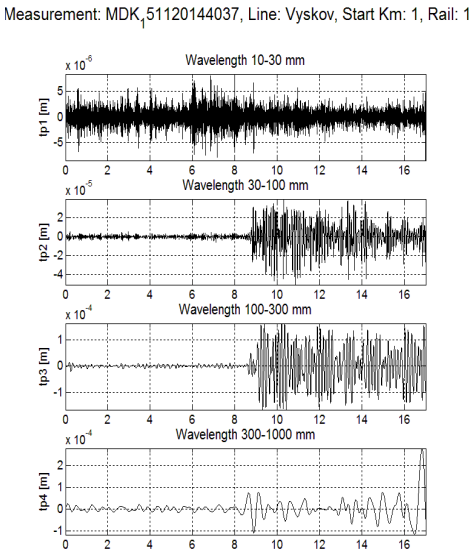
z uvedených parametrů, je nutné usek rozdělit na několik samostatných vyhodnocovacích úseků. Využívají se také jako případný porovnávací parametr mezi jednotlivými oblouky.

Je možné je získat a určit vizuálně při prohlídce úseku (preferováno), z pasportu trati či jiných zdrojů.

2.3. Zpracování měřených dat

2.3.1. Úvod

Pro sledování, vyhodnocování a kvantifikaci dat jsou využívány výpočty plovoucích průměrů RMS a PP, RMS a PP celého úseku a procentuální překročení hodnot RMS a PP), neboť je důležitá nejen informace o hodnotě překročení normových hodnot, ale i o délce na které k překročení došlo.



Obr. 6. *Přechod z kolejnic již vyměněných (do staničení cca 8,5 m) na kolejnice doposud nevyměněné v úseku Vyškov (ilustrativní obrázek)*

V rámci vyhodnocování je možno vyhodnocovat celý měřící úsek (jeden záznam), avšak v případě dlouhých či nekonzistentních záznamů se doporučuje měření rozdělit na několik kratších úseku pro samostatná vyhodnocení. Bude-li měření odpovídat záznamu na Obr. 4, nabízí s rozdělení na staničení 0 až 8 m a 10 až 16 m. V případě vyhodnocení celého měření může být např. procentuální překročení hodnot zkreslující.

Vyhodnocení vychází z normy ČSN 13231-3 [13] z roku 2006, neboť stávající ČSN 13231-3 [1] z roku 2012 již neobsahuje podklady k RMS. S RMS však tato metodika pracuje především z důvodu možnosti využití dat naměřených před účinností normy ČSN 13231-3 [1].

Primární měřený signál z měřícího zařízení je nutno upravit dle [8].

2.3.2. Vlnovité deformace

Délka výpočetního okénka

Počet vzorků pro vyhodnocení je dán měřícím krokem, avšak délky výpočetních okének jsou stanoveny jako 5-násobky délky nejdelší vlny délky daného pásma λ_p

Vlnová délka [mm]	10-30	30-100	100-300	300-1000
Délka výpočetního okénka *L* [m]	0,15	0,5	1,5	5

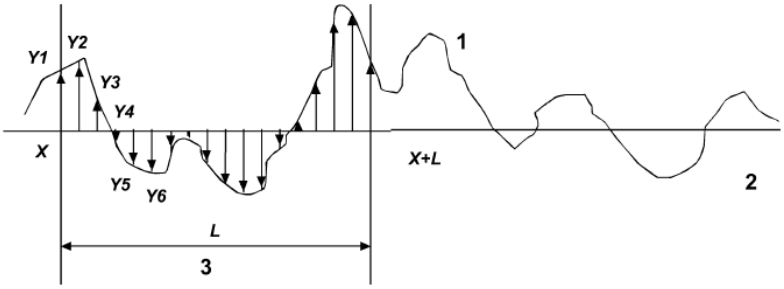
Tab. 1: Délka výpočetního okénka *L* (v tabulce jsou pro porovnání uvedeny délky výpočetního okénka i pro další vlnová pásma než jen pro skluzové vlny).

Délka vyhodnocovaného úseku $L_{e,p}$ se získá ze změřené délky L_m jako

$$L_{e,p} = L_m - 2 \cdot 0.5 \cdot \lambda_p \quad [\text{m}] \quad (17)$$

kdy 0,5. λ_p je jednou bráno ze začátku záznamu a podruhé z konce záznamu.

Plovoucí průměr RMS



Obr. 7. *Záznam z měření vlnovité deformace s vyznačením ekvidistantních vzorků y_i výpočetního okénka o stanovené délce L [9]*

Plovoucí průměry efektivních hodnot RMS (Root Mean Square) zde počtně odpovídá výpočtu směrodatné odchylky tj. *n* ekvidistantních vzorků y_i výpočetního okénka o stanovené délce *L*

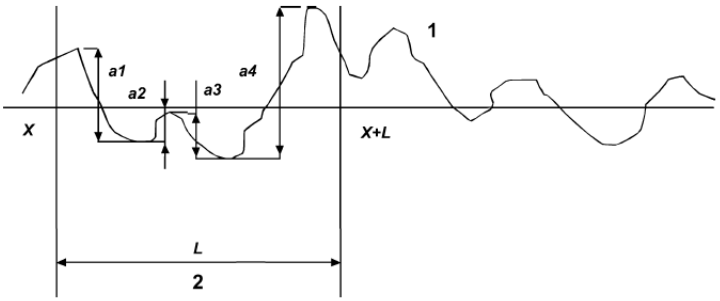
$$RMS(x, L) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \frac{y_i^2}{n-1}} \quad [\text{mm}] \quad (18)$$

RMS celého úseku

Výpočet odpovídá výpočtu Plovoucího průměru RMS. Délka výpočetního okénka je délka změřeného úseku.

$$RMS(x, L_m) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \frac{y_i^2}{n-1}} \quad [\text{mm}] \quad (19)$$

Plovoucí průměr PP



Obr. 8. *Záznam z měření vlnovité deformace s vyznačením rozdílů po sobě jdoucích vrcholů amplitud měřených a_i „mikro-výšek“ výpočetního okénka o stanovené délce L [9]*

Klouzavé aritmetické průměry hodnot PP (“špička-špička”) tj. rozdílů po sobě jdoucích vrcholů amplitud měřených a_i „mikro-výšek“

$$PP(x, L) = \frac{\sum_{i=1}^{n} a_i}{n} \quad [\text{mm}] \quad (20)$$

PP celého úseku

Výpočet odpovídá výpočtu Plovoucího průměru PP avšak za délku výpočetního okénka je stanovena délka změřeného úseku.

$$PP(x, L_m) = \frac{\sum_{i=1}^{n} a_i}{n} \quad [\text{mm}] \quad (21)$$

Procentuální překročení hodnot RMS a PP

Je počítáno dle ČSN EN 13231-3 [1] přílohy C.1. za využití hodnot z Tab. 2.

	RMS [µm]				PP [µm]			
Vlnová délka	10-30	30-100	100-300	300-1000	10-30	30-100	100-300	300-1000
Limity	4	4	12	40	10	10	30	100

Tab. 2: Limity RMS a PP [9] (v tabulce jsou pro porovnání uvedeny délky výpočetního okénka i pro další vlnová pásma než jen pro skluzové vlny).

2.3.3. Sledování souvisejících parametrů

Při zpracování a následném vyhodnocení je nutné zohlednit délku sledovaného úseku a v případě, že se v daném úseku mění některý z uvedených parametrů, je nutné úsek rozdělit na několik samostatných vyhodnocovacích míst.

Převýšení koleje

Pro stanovení převýšení koleje postačuje výpočet aritmetického průměru

$$D(x, L) = \frac{\sum_{i=1}^{n} D_i}{n} \quad [\text{mm}] \quad (22)$$

V případě, že je některá hodnota D_i výrazně odlišná od ostatních, vyřadí se nebo se provede rozdělení úseku dle první věty této kapitoly.

Rozchod koleje

Pro stanovení rozchodu koleje postačuje výpočet aritmetického průměru

$$u(x, L) = \frac{\sum_{i=1}^{n} u_i}{n} \quad [\text{mm}] \quad (23)$$

V případě, že je některá hodnota u_i výrazně odlišná od ostatních, vyřadí se nebo se provede rozdělení úseku dle první věty této kapitoly.

Směrové poměry

Pro stanovení poloměru oblouku koleje postačuje výpočet aritmetického průměru

$$R(x, L) = \frac{\sum_{i=1}^{n} R_i}{n} \quad [\text{m}] \quad (24)$$

V případě, že je některá hodnota R_i výrazně odlišná od ostatních, vyřadí se nebo se provede rozdělení úseku dle první věty této kapitoly.

Měření rychlostí

U oblouků s předpokládanou konstantní rychlostí vlaků, je výsledkem měření jediná rychlost V_i změřená nejčastěji na čele soupravy.

U oblouků s předpokládanou změnou rychlostí vlaků, je výsledkem měření několik sad rychlostí. Z každé sady je vypočtena rychlost aritmetickým průměrem zaznamenaných hodnot

$$V = \frac{\sum_{i=1}^{n} V_i}{n} \quad [\text{km/h}] \quad (25)$$

O způsobu užití konkrétní výsledné rychlosti rozhoduje umístění změřeného a vyhodnocovaného profilu v rámci daného oblouku.

Další parametry

Slouží k zohlednění délky sledovaného úseku a v případě, že se v daném úseku mění některý z uvedených parametrů, je nutné usek rozdělit na několik samostatných vyhodnocovacích úseků. Využívají se také jako případný porovnávací parametr mezi jednotlivými oblouky.

2.3.4. Výpočet váženého I, E

Výpočet váženého I_v, E_v slouží k porovnání jednotlivých měřených míst.

Ideální rychlost pro konkrétní oblouk získáme ze vzorce

$$V = \sqrt{\frac{D_{eq}.R}{11{,}8}} \quad [\text{mm}] \quad (26)$$

Přebytek převýšení konkrétní soupravy pak

$$E_i = D - \frac{11{,}8.V_i^2}{R} \quad [\text{mm}] \quad (27)$$

a analogicky nedostatek převýšení

$$I_i = \frac{11{,}8.V_i^2}{R} - D \quad [\text{mm}] \quad (28)$$

Vliv jednotlivých souprav je zohledněn pomocí její hmotnosti

$$E_v = \frac{\sum_i^n m_i.E_i}{\sum_i^n m_i} \quad [\text{mm}] \quad (28)$$

$$I_v = \frac{\sum_i^n m_i.I_i}{\sum_i^n m_i} \quad [\text{mm}] \quad (28)$$

2.4. Vyhodnocení

2.4.1. Vzájemné porovnávání jednotlivých měřících míst

Vzhledem ke skutečnosti, že neexistují dvě měřící místa se všemi shodnými parametry, je nutné při vzájemném porovnávání těchto míst vždy určit takové parametry, která jsou na porovnávaných místech shodné či alespoň podobné (např. poloměr oblouku, skladba a hmotnosti souprav apod.). Drobné nepodobnosti v parametrech (R, D, V) je možné kompenzovat pomocí váženého nedostatku (I_v) a přebytku převýšení (E_v). Porovnávání nelze provádět univerzálně, neboť je nutné přihlédnout k provozu a opravných/údržbovým práce (poslednímu termínu výchozího stavu „0“, nejlépe poslední výměně/broušení kolejnic).

Následně je možné porovnat hodnoty plovoucích průměrů RMS a PP, RMS a PP celého měřícího místa a procentuálního překročení hodnot RMS a PP.

2.4.2. Sledování rozvoje skluzových vln

V případě více měření (v časovém rozestupu minimálně několika týdnů) na jednom měřícím místě, je možné sledovat vývoj hodnot plovoucích průměrů RMS a PP, RMS a PP celého měřícího místa a procentuálního překročení hodnot RMS a PP v čase.

2.4.3. Kombinace

Sledováním rozvoje skluzových vln v čase a porovnáváním několika podobných nebo nejlépe shodných míst lze pomocí nástrojů statistické analýzy definovat důležité faktory a parametry zrychlující nebo naopak zpomalující rychlost rozvoje vlnovitých deformací.

3. Novost postupů a zdůvodnění metodiky

Novost postupu spočívá v zahrnutí sledování souvisejících parametrů konstrukce kolejové jízdní dráhy do dlouhodobého sledování rozvoje skluzových vln. Nejen převýšení koleje, ale i další parametry a konstrukce drážního svršku a drážního spodku v daném oblouku jsou při návrhu vždy kompromisem mnoha vstupních hodnot a nezahrnují všechny možné provozní stavy vyskytující se na daném úseku (lehké rychlé osobní vlaky vs. těžké pomalé nákladní vlaky, projíždějící vs. zastavující vlaky apod.). Pro možné porovnání více oblouků a možnosti predikce rozvoje vln je zavedena hodnota váženého nedostatku, resp. přebytku převýšení zohledňující hmotnost projíždějících souprav.

Novost sledování rozvoje skluzových vln dle této metodiky spočívá zejména v komplexnosti sledování všech relevantních parametrů, jejich evidenci a vyhodnocování v dlouhodobém horizontu.

4. Popis uplatnění certifikované metodiky

Metodika umožňuje dlouhodobý monitoring a porovnávání jak jednoho konkrétního místa (např. oblouku), tak i vzájemné porovnání několika oblouků. V případě dostatečného množství dat je možné stanovit trend rychlosti rozvoje vln v daném úseku a tím predikovat budoucí stav a umožnit plánování preventivních a údržbových prací.

Analýzou procesů a faktorů ovlivňujících rychlost rozvoje vln bude možné vytvořit podklady pro projekční činnosti, aby byly nežádoucí faktory eliminovány nebo alespoň minimalizovány již v projekční fázi.

5. Ekonomické aspekty

Vlnkovitost a skluzové vlny jsou původcem mnoha negativních jevů působících na člověka, kolejová vozidla a jízdní dráhu.

Jedná se především o:

- přídavné dynamické síly působící na vozidla a součásti konstrukce koleje;
- vlivy působící na interakci mezi jízdní dráhou a vozidlem;
- překračování únavové pevnosti kolejnic;
- vliv na výškové parametry koleje;
- snížení držebnost a zvýšení opotřebení upevnění kolejnic;
- zkrácení životnost železničního spodku a klenutých mostů;
- vliv na spotřebu energie;
- šíření vibrací a hluku do okolí a na cestující. [5]

Odstraněním nebo minimalizací výše uvedených vlivů dojde k prodloužení životnosti koleje, čímž dojde ke snížení nákladů na údržbu, menšímu počtu výluk a naopak ke zvýšení spolehlivosti a kvality železniční dopravní cesty a kolejové dopravy obecně.

6. Seznam použité literatury

[1] *ČSN EN 13231-3 Železniční aplikace - Kolej - Přejímka prací - Část 3: Přejímka reprofilace kolejnic v koleji. 2012.*

[2] SŽDC SR103/4(S) Využívání měřicích vozů pro železniční svršek s kontinuálním měřením tratě pod zatížením

[3] Předpis SŽDC (ČD) S67 Vady a lomy kolejnic.

[4] Leaflet UIC 712 Rail defects. 4th edition, Paris: UIC, 2002. 111 pages. ISBN 2-7461-0341-9 (English version)

[5] FUNKE, H. *Broušení kolejnic*. Praha: Elka Press. 1992. 122 str.

[6] SCHOLLE, S., *Možnosti měřících vozů TUDC železničního svršku pro detekci kolejnicových vad.* Příspěvek na workshopu Výhybky a výhybkové konstrukce. Kolejnicové vady. Brno. 2015.

[7] *VALEHRACH, J., Vlnkovitost kolejnice a skluzové vlny, příspěvek na konferenci 16. odborná konference doktorského studia Juniorstav 2014, ISBN 978-80-214-4851-3, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Brno, 2014*

[8] *ČSN 736330-1 Konstrukční a geometrické uspořádání koleje železničních drah a její prostorová poloha – Část 1: Projektování. 2008.*

[9] *ČSN EN 15610 Železniční aplikace – Emise hluku – Měření drsnosti povrchu kolejnic ve vztahu k hluku valení. 2009.*

[10] *ČSN EN 13848-2 Železniční aplikace - Kolej - Kvalita geometrie koleje - Část 2: Měřicí systémy - Měřicí vozy. 2006.*

[11] *ČSN EN 13848-4 Železniční aplikace - Kolej - Kvalita geometrie koleje - Část 4: Měřicí systémy - Lehké kolejové prostředky a ruční zařízení. 2012.*

[12] *ČSN EN 13848-3 Železniční aplikace - Kolej - Kvalita geometrie koleje - Část 3: Měřicí systémy - Stroje pro stavbu a údržbu koleje. 2009.*

[13] *ČSN EN 13231-3 Železniční aplikace - Kolej - Přejímka prací - Část 3: Přejímka reprofilace kolejnic v koleji. 2006.*

7. Seznam publikací, které předcházely metodice

[1] VALEHRACH, J.; GUZIUR, P.; ŘÍHA, T.; PLÁŠEK, O., Assessment of rail long-pitch corrugation, článek v *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, ISSN 1757-899X, Czech Technical University in Prague, Prague, 2017

[2] VALEHRACH, J.; ŘÍHA, T.; DUŠEK, E., Cant Excess and Cant Deficiency Evaluation in Relation to Train Speeds, článek v *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, ISSN 2336-5382, Czech Technical University in Prague, Prague, 2017

[3] VALEHRACH, J., Long-pitch Corrugation Measurement – Tram lines and Railway lines Comparison, příspěvek na konferenci *9th International Scientific Conference of Civil Engineering and Architecture YOUNG SCIENTIST*, ISBN 978-80-553-3136-2, Technical University of Košice, Faculty of Civil Engineering, Košice, 2017

[4] VALEHRACH, J.; ŠMÍD, J., Monitoring of Track Sections with Long-pitch Corrugation, článek v *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, ISSN 2336-5382, Czech Technical University in Prague, Prague, 2016

[5] VALEHRACH, J., Skluzové vlny- teorie a praxe, *Juniorstav 2015*, ISBN 978-80-214-5091-2, Vysoké učení technické v Brně, Brno, 2015