

Dynamické působení železniční dopravy na kolejový rošt s pružným upevněním kolejnic při průjezdu obloukem

Článek se věnuje měření, analýze a srovnání dynamických parametrů pružných bezpodkladnicových upevnění kolejnic Vossloh W 14 a Pandrol FC I umístěných v koleji ve směrovém oblouku. Měření byla prováděna in situ podle speciálně utvořené metodiky s využitím vhodného matematického aparátu pro hodnocení naměřených parametrů. Dalším cílem prací bylo získat výsledky vhodné pro zpřesňování výpočetních modelů komponentů železničního svršku.

Ruku v ruce s rostoucí životní úrovní lidstva v nejrozvinutějších státech světa dochází k navyšování potřeb na přepravní výkon a kvalitu dopravy. V případě železniční dopravy přináší tato problematika nejen požadavky na moderní, bezpečná a spolehlivá vozidla osobní a nákladní dopravy, šetrná k životnímu prostředí a kompatibilní s technickými podmínkami ostatních států Evropské unie, ale rovněž požadavky na odpovídající servis, logistiku a v neposlední řadě také na infrastrukturu [1].

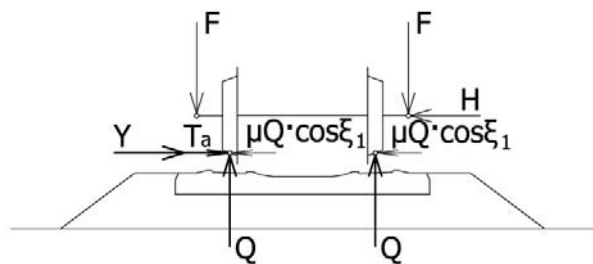
Všeobecná tendence zvyšování celkové tuhosti konstrukce železničního svršku (betonové pražce, pevná jízdní dráha apod.) je na jedné straně nutnou podmínkou provozování koridorových a ostatních hlavních tratí SŽDC rychlostmi 160 km·h⁻¹ a více, na druhé straně však také zdrojem zvýšených dynamických interakčních sil kolo – kolejnice, které při nezajištění optimálních pružných a tlumících vazeb mezi kolejnicí a pražcem nepříznivě ovlivňují nejen kolejové vozidlo, ale též konstrukci železničního svršku a spodku, geometrické parametry koleje a z toho vyplývající vysoké náklady na údržbu.

Vibrace vzniklé na kontaktu kolo – kolejnice zachycuje a tlumí tzv. primární resp. sekundární vypružení. Primární vypružení reprezentuje konstrukce upevnění kolejnice – pružné podložky a svěrky (spony), pryžová podložka umístěná pod patou kolejnice příp. i penefolová nebo polyetylenová umístěná pod podkladnici. Sekundární vypružení je v konstrukci tratě zastoupeno kolejovým ložem – zachycuje a tlumí zejména nižší frekvence. Na základě těchto skutečností se jeví jako velice významná aplikace odpovídajícího systému pružného upevnění, jehož zásadní charakteristikou je bezesporu statická a dynamická tuhost upevnění, viz např. [2].

VOZIDLO A KOLEJ VE SMĚROVÉM ZAKŘIVENÍ

Připomeňme, že druh a velikost dynamických účinků od projíždějící zátěže je přímo závislá na rychlosti, typu, počtu a způsobu jízdy vlaků, přilehlých terénních podmínkách, konstrukci, stavu a údržbě drážního tělesa a kolejových vozidel, výškovém a v neposlední řadě také směrovém vedení trasy. Pouze dokonalá znalost problematiky vzájemného působení vozidla a koleje nám umožňuje pochopit zákonitosti a principy vibračních jevů v koleji ve směrovém zakřivení.

Kolo s okolkem nabíhá na kolejnici v oblouku pod úhlem náběhu α . Stýká se přitom s hlavou kolejnice ve dvou místech. První nosný bod leží na temeni, přenáší se zde svislé zatížení od projíždějící soupravy do kolejového roštu. Druhé místo je předsazené tomuto bodu. Dochází



Obr. 1 – Síly působící na dvojkolí a kolej

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.

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. Zanedbáním setrvačných sil daných hmotností dvojkolí a zrychlením v příčném resp. svislém směru, dostáváme teoretické rozložení sil působících na soustavu dvojkolí – kolej, viz obr. 1. Slabě jsou vyznačeny síly, kterými působí dvojkolí na kolej, silně pak odpovídající reakce v kolejovém roštu. Řídící sílu P dostaneme z rovnováhy sil v příčném směru ze superpozice rámové síly H a třecích sil $2\mu Q \cos \xi_1$, resp. z reakcí součtem třecí síly T_x a vodící síly Y . Z uvedeného vyplývá vztah pro výpočet rámové síly H [N]:

$$H = Y - \mu Q \cdot \cos \xi_1 \quad (1)$$

kde Q [N] je kolová síla, μ [-] součinitel adheze a ξ_1 úhel, který svírá průvodič ke středu otáčení q_1 s osou podvozku.

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 výrazně. K dotyku ve dvou bodech dochází nejčastěji v případě nepotřebených kol a kolejnic, zatímco s dotykem v bodě jednom se nejpravděpodobněji setkáme u kolejnic ve vnějším pásu [4].

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). Velikost takto projektovaného převýšení je závislá na rychlosti vlakové soupravy V [km·h⁻¹] a na velikosti poloměru oblouku R [m]. Za předpokladu, že všechny vlaky projíždějí konkrétním směrovým obloukem stejnou rychlostí, se projektuje převýšení teoretické. Hodnota teoretického převýšení je taková, že výslednice svislého zrychlení vyvolaného gravitací a odstředivého zrychlení, vyvolaného průjezdem vozidla, působí kolmo ke spojnici temen kolejnicových pásů. Teoretické převýšení D_{eq} [mm] lze spočítat podle vzorce:

$$D_{eq} = \frac{11,8 \cdot V^2}{R} \quad (2)$$

Ve skutečnosti se však vlaky daným traťovým úsekem stejně rychle nepohybují. Namísto teoretického převýšení se proto povětšinou navrhuje tzv. projektované převýšení koleje D [mm]. Projektované

převýšení koleje musí z hlediska nedostatku resp. přebytku převýšení vyhovět rychlosti všech vlaků v daném úseku trati. Soupravy jezdou rychlostí:

$$v > \sqrt{\frac{D_{eq} \cdot R}{11,8}} \quad (3)$$

projíždějí obloukem s nedostatkem převýšení I [mm], čímž dochází ke zvětšení zatížení vnějšího kolejnicového pásu nárůstem vodicí a svislé kolové síly. Oproti tomu soupravy s rychlostí:

$$v < \sqrt{\frac{D_{eq} \cdot R}{11,8}} \quad (4)$$

projíždějí obloukem s přebytkem převýšení E [mm], kdy můžeme sledovat zvětšení zatížení vnitřního kolejnicového pásu a to především nárůstem svislé kolové síly. Mezní hodnoty pro nedostatek resp. přbytek převýšení jsou uvedeny v [3].

POPIS EXPERIMENTU

Pro účely experimentu byly vybrány dva nejběžnější typy pružných bezpodkladnicových upevnění kolejnic k podporám používaných v současnosti na hlavní železniční síti v České republice [5] – upevnění Vossloh W 14 resp. upevnění Pandrol FC I.

Měřicí stanoviště upevnění Vossloh leží v pravostranném směrovém oblouku dvojkolejné trati č. 270 v km 213,692 mezi železniční stanicí Hranice na Moravě a zastávkou Bělotín. Směrový oblouk je zřízený jako kružnicový o poloměru $R = 704$ m se symetrickými krajními přechodnicemi tvaru kubické paraboly s délkou $l_{p1} = l_{p2} = 138,530$ m. Převýšení oblouku je $p = 113$ mm. Trať je zde vedena v nízkém zářezu, měřicí stanoviště je vzdáleno cca 100 m od železničního přejezdu místní komunikace. Trať sklonově stoupá $+4,62$ ‰ ve směru na Bělotín. Zájmový úsek trati 2. a 3. TŽK byl v období duben 2001 až červen 2004 modernizován. Stavební práce byly prováděny v koordinaci firmy ŽS Brno, a. s. (nyní OHL ŽS), hlavního zhotovitele stavby. Na trati je zavedený levostranný provoz. Měření dynamických a akustických parametrů upevnění Vossloh bylo uskutečněno v koleji č. 2 21. června 2007 za teploty vzduchu 25 °C. Zaznamenávány byly pouze soupravy jezdící ve směru Hranice na Moravě – Ostrava.

Chování kolejnicového upevnění Pandrol bylo pozorováno v rámci měření, jež se uskutečnilo dne 26. června 2007 na téže trati v koleji č. 1 v mezistaničním úseku Lipník nad Bečvou – Drahotuše ve staničení km 205,045. Měřicí stanoviště leží v levostranném kružnicovém oblouku o poloměru $R = 694$ m a převýšení $p = 120$ mm, s krajními přechodnicemi délek $l_{p1} = 188,000$ m a $l_{p2} = 213,000$ m. Trať je zde vedena v podélném sklonu $+3,69$ ‰, drážní těleso tvoří násyp výšky cca 5 m. Vlastní modernizace tohoto úseku začala v září 1999, veškeré stavební práce utichly koncem října 2002 a byly řízeny opět firmou ŽS Brno, a. s. Zaznamenávány byly pouze průjezdy vlaků jedoucích z Hranice na Moravě směrem Přerov. V den měření bylo oblačno s teplotami vzduchu do 20 °C.

Tabulka 1 – Výpis hodnocených vlaků a jejich charakteristiky

Vossloh W 14					Pandrol FC I				
Čas	Hnací vozidlo	Kategorie vlaku	Délka [m]	Rychlost [km·h ⁻¹]	Čas	Hnací vozidlo	Kategorie vlaku	Délka [m]	Rychlost [km·h ⁻¹]
12:10	680	SC 505	185,30	125	9:49	680	SC 504	185,30	120
9:50	363	R 733	16,80	112	10:37	363	Os 3336	16,80	107
12:55	363	R 737	16,80	95	9:41	363	Os 3306	16,80	100
13:00	363	N	16,80	70	9:58	363	N	16,80	68
12:40	163	Os 2909	16,80	110	11:18	163	R 734	16,80	105
9:32	151	IC 583	16,74	111	10:45	151	EC 108	16,74	106

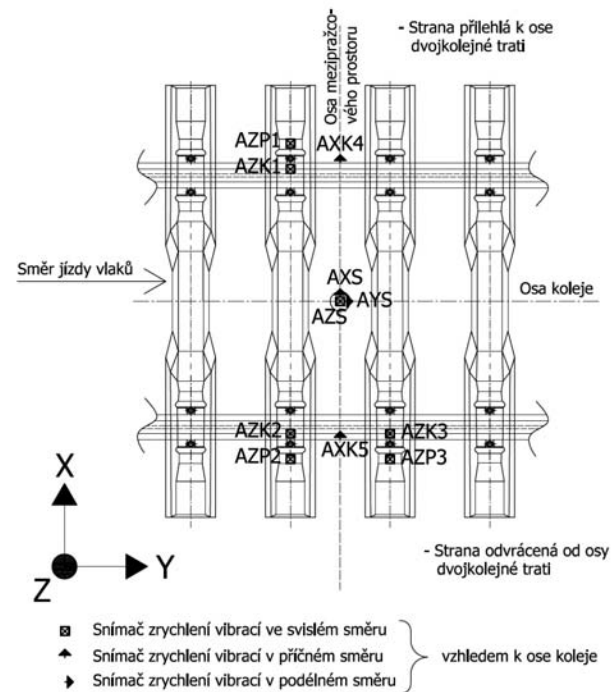
Charakteristiky vybraných vyhodnocovaných vlaků jsou přehledně shrnuty v tab. 1. Pro účely tohoto článku byly srovnávány pouze referenční soupravy SC Pendolino (srovnatelná rychlost jízdy s rozdíly do 5 km·h⁻¹, srovnatelný nedostatek převýšení) resp. výřezy vybraných hnacích vozidel osobních i nákladních vlaků různých kategorií.

Výběr a umístění snímačů

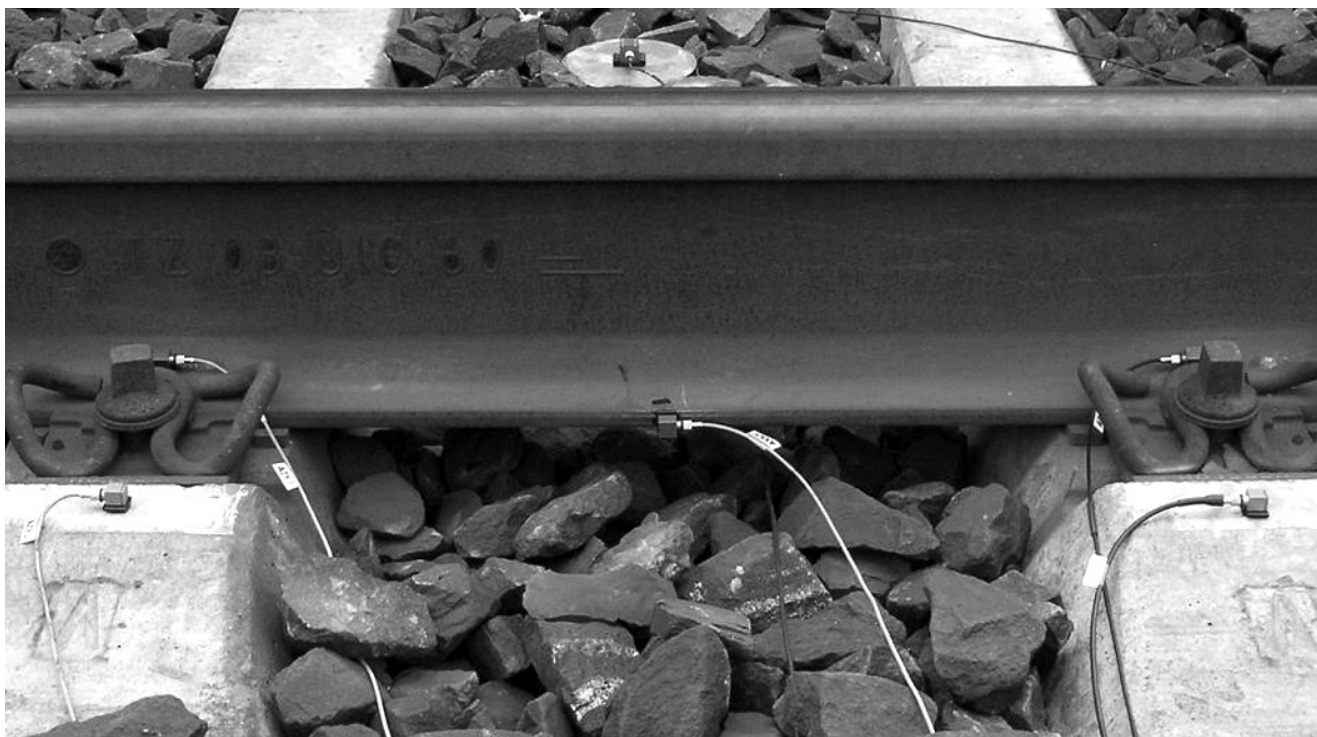
V rámci měřicí kampaně byl kolejový rošt osazen osmi jednoosými a jedním tříosým snímačem zrychlení vibrací, viz obr. 2 resp. obr. 3. Umístění snímačů koresponduje s měřením v přímém úseku trati [6].

Pro omezený rozsah tohoto článku byly k dalšímu sledování vybrány pouze ty signály, které jsou z pohledu porovnání jízdy vozidla obloukem nejzajímavější. Jmenovitě se jedná o signál AZK2, AXK5, AZP2 a AXS.

Akcelerometry vertikálních vibrací byly umístěny co nejtěsněji k uzlu upevnění, přičemž AZK2 na patu kolejnice resp. AZP2 na pražec. Tím se do značné míry eliminoval vliv šíření vibrací materiálem mimo vlastní upevnění. Snímače tak objektivněji zaznamenávali tlumící vlastnosti uzlu. Pro potřeby měření byl vybrán uzel upevnění na hlavě pražce, kde je pražec namáhán od svislého zatížení přibližně stejně, ať již ho uvažuje-



Obr. 2 – Schéma kolejového roštu osazeného snímači zrychlení vibrací



Obr. 3 – Fotodokumentace osazení kolejového roštu snímači in situ – upevnění Vossloh W 14

me jako prostý nosník rovnoměrně podepřený po celé své délce nebo pouze částečně v krajních oblastech. Při vlastním měření se tak výrazně potlačil vliv podbití koleje na charakteru chování konstrukce.

Snímač zrychlení příčných vibrací na patě kolejnice AXK5 byl umístěn do osy mezipražcového prostoru, v příčném pohledu vně rozchod koleje. Tato pozice je z hlediska chápání kolejnicového pásu jako spojitého, rovnoměrně podepřeného nosníku nekonečné délky v diskretních podporách velice zajímavá.

Uvedené akcelerometry byly umístěny na vnější straně oblouku koleje. Sledované vlaky totiž vybranými úseky tratě projížděly v převážně většině případů s nedostatkem převýšení, což mělo za následek nárůst zatížení vnějšího kolejnicového pásu v souvislosti s výše popsanými jevy.

Vibrace, šířící se šterkovým ložem dále do konstrukčních vrstev železničního spodku a zemního tělesa, jsou z hlediska stability kon-



Obr. 4 – Přípravek k fixaci akcelerometru v kolejovém loži – měřící polokoule

strukce trati klíčové. Jedná se o vibrace převážně nízkých frekvencí. Úkolem optimálně navrženého upevnění kolejnic je mimo jiné tyto vibrace co nejvíce eliminovat, což má pozitivní vliv na zachování navržených geometrických parametrů koleje (GPK). Dynamické účinky jedoucí soupravy na kolejové lože byly pozorovány trojosým snímačem zrychlení vibrací umístěným v průsečíku osy mezipražcového prostoru s osou koleje. Vzhledem ke směrovému zakřivení koleje lze jako nejzajímavější uvažovat vibrace šířící se kolmo na osu koleje – signál AXS.

Trojosý akcelerometr byl ve šterku fixován pomocí speciálního přípravku ve tvaru polokoule, viz obr. 4. Zrna šterku kolejového lože se s polokoulí stýkají na větší ploše, než v případě standardně užívaných desek či trnů, čímž se zároveň zvětšuje prostor pro přímý přenos vibrací a měření se tak stává objektivnější.

Použité akcelerometry byly před měřením v trati ověřeny kalibrátory. Rychlosti kolejových vozidel byly odečítány laserovým rychloměrem Buschnell 10-1900.

Měřicí řetězec

Měřená data byla zaznamenána a uchována k pozdějšímu vyhodnocení pomocí integrované PC sestavy DEWE 2502 od firmy Dewetron. V lokalitě u Hranic na Moravě bylo provedeno měření zrychlení vibrací na jedenácti kanálech.

VYHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH DAT

Po provedeném rozboru problematiky a realizaci vlastního měření v terénu byly k analýze naměřených dat použity metody a parametry:

- časového zobrazení průběhu zrychlení kmitání, dále extrémů zrychlení kmitání a efektivní hodnoty zrychlení kmitání,
- frekvenční analýzy s využitím průběhu amplitudového spektra (pro přechod z časové do frekvenční oblasti byl využit algoritmus rychlé Fourierovy transformace resp. algoritmus tzv. Welchovy metody, kdy se v podstatě jedná o průměrovací metodu založenou na aplikaci rychlé Fourierovy transformace),
- časově-frekvenční spektrální analýzy (pro přechod z časové do časově-frekvenční oblasti je použit algoritmus Born – Jordanovy transformace).

Efektivní hodnota je z hlediska hodnocení vibrací v časové oblasti velmi důležitá, protože odráží časový průběh amplitud vibrací a zároveň má přímý vztah k jeho energetickému obsahu a je tedy i měřítkem nebezpečnosti a škodlivosti vibrací. Efektivní hodnota a_{ef} [$m \cdot s^{-2}$] zrychlení (v zahraniční literatuře často označovaná Root Mean Square – RMS) je definována podle vztahu:

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

kde $a(t)$ [$m \cdot s^{-2}$] je okamžitá hodnota zrychlení a T [s] je doba, pro kterou je potřeba určit efektivní hodnotu zrychlení, tedy doba průjezdu soupravy nad měřicím stanovištěm resp. snímačem.

Frekvenční spektra zrychlení byla vypočítána aplikací Fourierovy transformace podle definičního vztahu [7]:

$$AS_a(f) = \int_{-\infty}^{\infty} a(t) \cdot e^{-j2\pi ft} \cdot dt \quad (6),$$

kde f [Hz] je frekvence, t [s] čas, $a(t)$ [$m \cdot s^{-2}$] průběh zrychlení v časové oblasti a $AS_a(f)$ [$m \cdot s^{-2}$] jeho reprezentace ve frekvenční oblasti, j odpovídá imaginární jednotce. Pro analýzu naměřených dat je často velmi výhodná časová lokalizace významných frekvencí obsažených v měřeném signále.

Pro určení časové lokalizace frekvenčních komponent u naměřených signálů nelze použít klasický postup frekvenční analýzy, ale je nutné využít jiné transformační postupy a jiné výpočetní metody. Jedním z možných postupů je aplikace tzv. časově frekvenčních transformací. V rámci příspěvku je prezentováno použití Born – Jordanovy časově frekvenční transformace definované základním vztahem:

$$CT_x(t, \omega) = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A_x(\theta, \tau) \cdot \psi(\theta, \tau) \cdot e^{-j\theta t} \cdot e^{-j\tau \omega} \cdot d\theta \cdot d\tau \quad (7),$$

kde symbol τ představuje časové posunutí, ω [$rad \cdot s^{-1}$] úhlovou frekvenci, θ frekvenční posunutí, $\psi(\theta, \tau)$ je jádrová funkce příslušné časově frekvenční transformace a $A_x(\theta, \tau)$ je funkce dvou proměnných τ a θ (relativních proměnných funkce signálu $x(t)$). Tato funkce je dána rovnicí:

$$A_x(\theta, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) \cdot x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \cdot e^{j\theta t} \cdot dt \quad (8).$$

Je vhodné podotknout, že tato úzkopásmová funkce je komplexní a představuje měřítko časově frekvenční korelace signálu, neboli vyjadřuje stupeň podobnosti mezi signálem a jeho posunutou verzí v časově frekvenční rovině. Jádrová funkce pro Born – Jordanovu transformaci je definována vztahem:

$$\psi(\theta, \tau) = \frac{\sin \frac{\theta \cdot \tau}{2}}{\frac{\theta \cdot \tau}{2}} \quad (9).$$

ANALÝZA DYNAMICKÝCH PARAMETRŮ UPEVNĚNÍ KOLEJNIC

K práci s naměřenými signály včetně jejich vyhodnocení byl použit software měřící ústředny DeweSoft a také pro tyto účely speciálně sestavený program VibroDiagRail. Analýza vibrací byla provedena na časových výřezech signálů z paty kolejnice (AZK2, AXK5), z hlavy pražce (AZP2) a ze šterkového lože (AXS). Výřezy byly upraveny tak, aby svým rozsahem odpovídaly délce ucelené vlakové soupravy kategorie SC resp. délce samotného hnacího vozidla osobních i nákladních vlaků zbylých kategorií. Vibrodiagnostika upevnění byla rozdělena na nízkofrekvenční v pásmu frekvencí $1 \div 80$ Hz a středněfrekvenční v pásmu $80 \div 600$ Hz. V případě vibrací na patě kolejnice měřených ve směru kolmém na osu koleje byla středněfrekvenční analýza rozšířena také o pásmo frekvencí $600 \div 1\,000$ Hz.

Časové průběhy signálů SC ukazují výraznější vislé dynamické zatížení AZK2 kolejnicového pásu upevněného k podporám pomocí konstrukce Pandrol (obr. 6, graf vlevo nahoře). Ve srovnání s konkurenčním upevněním jsou zvláště výmluvné efektivní hodnoty zrychlení vibrací uvedené v tab. 2, kde tyto hodnoty vycházejí v převážně většině případů vyšší u upevnění FC I, někdy i více než dvojnásobně. Zrychlení vibrací dosahuje v lokálních extrémech u upevnění Pandrol nezdídká hodnot blízkých se hranici $190 m \cdot s^{-2}$. U upevnění W 14 je tato hranice snížena na $80 m \cdot s^{-2}$. V ojedinělých případech došlo k výkyvům zrychlení vibrací na hodnoty až $300 m \cdot s^{-2}$ u upevnění Pandrol resp. $150 m \cdot s^{-2}$ u upevnění Vossloh. Tento jev je však v obou případech patrný pouze u jedné nápravy, čímž je ze statistického hlediska nevýrazný a nelze se na něj dále odvolávat. Určité zákonitosti lze však vysledovat při globálním pohledu na získané signály. Časový záznam průjezdu soupravy SC je dobře identifikovatelný pouze u upevnění Vossloh, kdy lze bez problémů lokalizovat jednotlivé podvozky vozových skříní (výrazné amplitudy) a určit tak počet vozů v soupravě. Dynamická odezva upevnění Pandrol je poměrně velká také mimo vlastní průjezd jednotlivých náprav, čímž je bližší určení vozové skladby velmi ztíženo. Toto chování bylo v menší či větší míře typické také pro ostatní směry a místa působení vibrací.

Časové průběhy zrychlení vibrací na patě kolejnice ve směru kolmém na osu koleje AXK5 jsou u obou typů upevnění podobné, viz grafy v levé části obr. 7. Lokální extrémy nepřesahují až na výjimky hodnoty $70 m \cdot s^{-2}$. Také efektivní hodnoty zrychlení vibrací RMS uvedené v tab. 2 vycházejí srovnatelně. Pouze na základě časové analýzy signálu tak nelze jednoznačně poukázat na závislost mezi dynamickou odezvou koleje v příčném směru a použitým typem upevnění.

Časové průběhy vertikálních zrychlení vibrací na pražci AZP2 (obr. 5 a obr. 6, graf vlevo dole) jsou výraznější u konstrukce Vossloh W 14, kde zrychlení dosahují v extrémech hodnot až $20 m \cdot s^{-2}$, zatímco u FC I pouze $15 m \cdot s^{-2}$. Větší než tyto uvedené amplitudy svým působením korespondují s chováním na patě kolejnice AZK2. To může poukazovat na výskyt imperfkcí na pojižděných hranách železničního dvojkolí. Pro příklad jmenujme poruchu křivosti oběžné plochy kola. Ze statistického

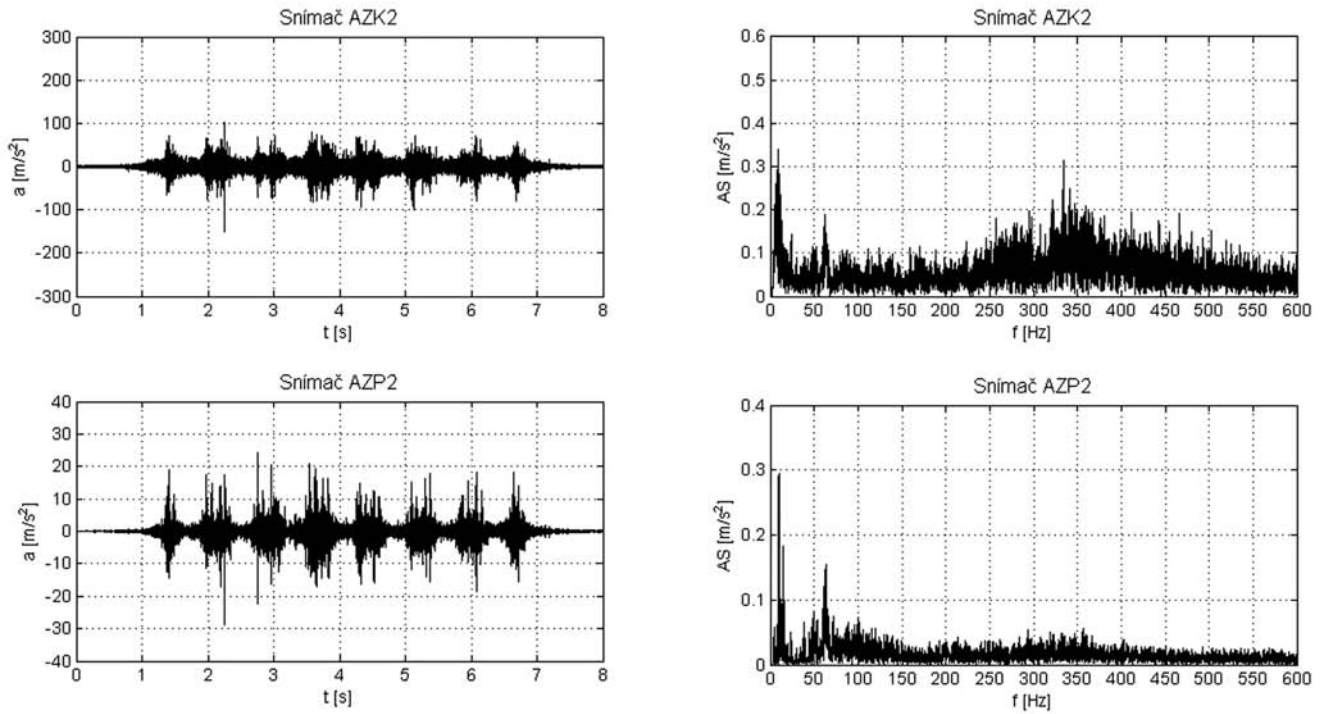
Tabulka 2 – Efektivní hodnoty (RMS) zrychlení vybrací v $m \cdot s^{-2}$ pro různé typy vlaků

Hnací vozidlo	Vossloh W 14				Pandrol FC I				Hnací vozidlo
	AZK2	AXK5	AZP2	AXS	AZK2	AXK5	AZP2	AXS	
680; SC 505	13,3	14,7	2,9	0,52	29,3	14,9	2,4	0,63	680; SC 504
363; R 733	33,6	54,2	9,3	0,75	83,5	65,1	3,4	0,62	363; Os 3336
363; R 737	57,5	80,9	8,1	0,82	48,2	31,4	3,0	0,60	363; Os 3306
363; N	45,1	66,2	5,5	1,03	46,4	30,8	2,2	0,38	363; N
163; Os 2909	76,9	93,7	10,0	0,71	83,2	40,4	3,2	0,56	163; R 734
151; IC 583	11,4	20,8	3,5	1,14	23,5	25,1	1,6	0,64	151; EC 108

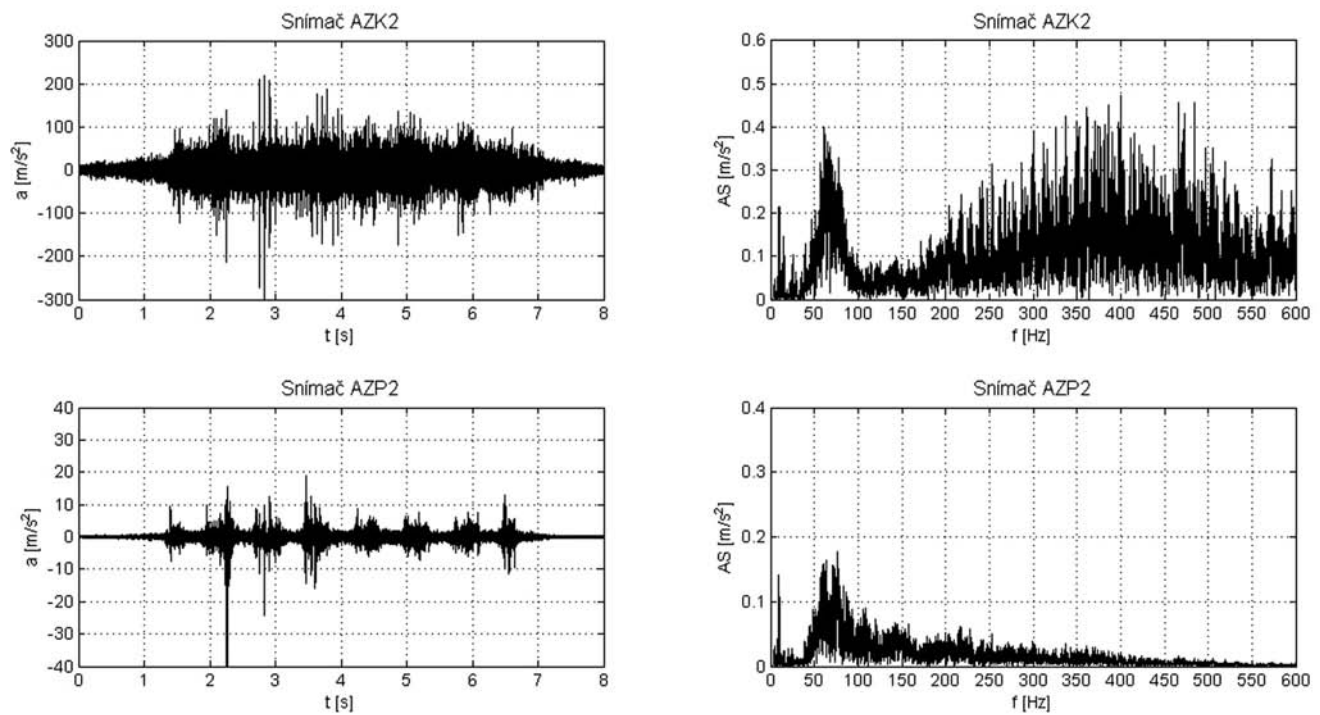
hlediska by však tyto amplitudy neměly mít na celkové chování obou konstrukcí zásadní význam. Také efektivní hodnoty RMS vycházejí u upevnění Vossloh pro všechny kategorie vlaků resp. jejich hnacích vozidel (vyjma soupravy řady 680) přibližně 2,5 násobně.

Z hlediska šíření příčných vibrací v horních vrstvách kolejového lože AXS vychází časová analýza dat lépe pro upevnění Pandrol. Toto

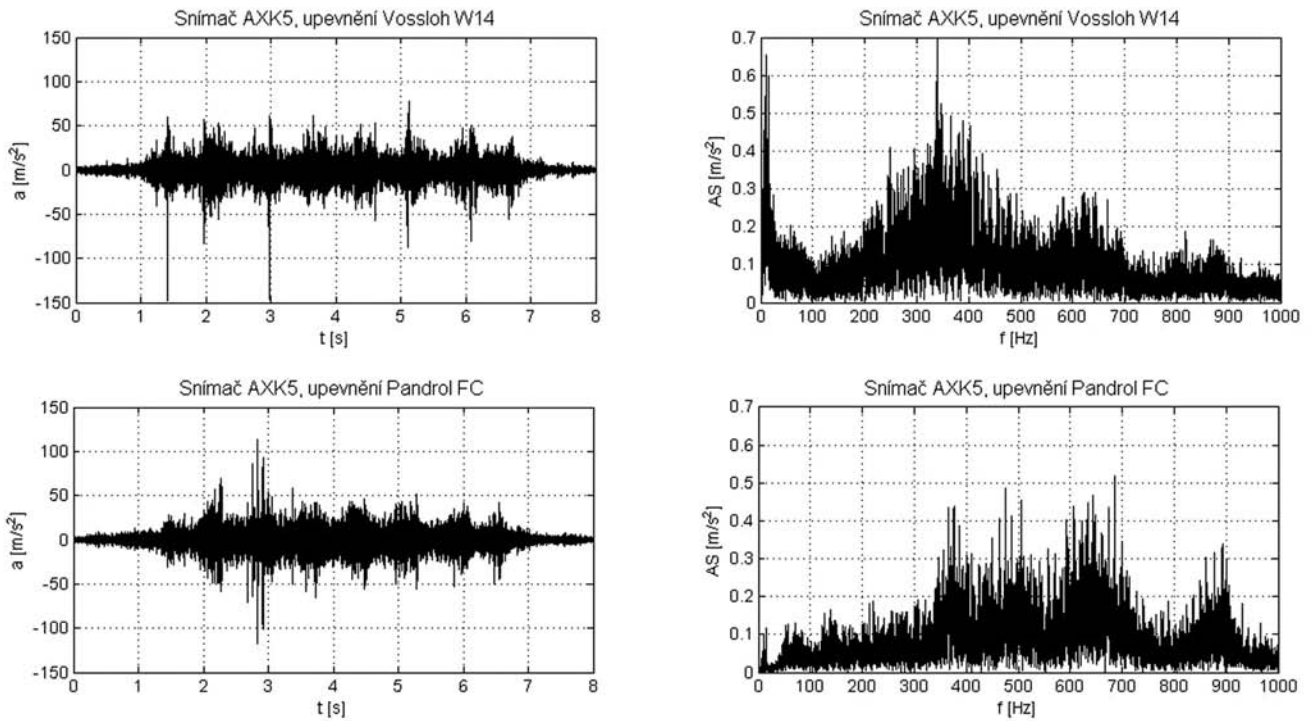
tvrzení lze podložit zejména efektivními hodnotami RMS, kde hodnoty u upevnění FC I dosahují u většiny signálů zhruba 60 % velikosti RMS hodnot pro upevnění W 14. Levá část obr. 8 dále ukazuje časový průběh průjezdu ucelených jednotek řady 680. Z obou grafů lze vyčíst maximální amplitudy zrychlení vibrací pohybující se na hranici 2,5 až 3,0 m·s⁻².



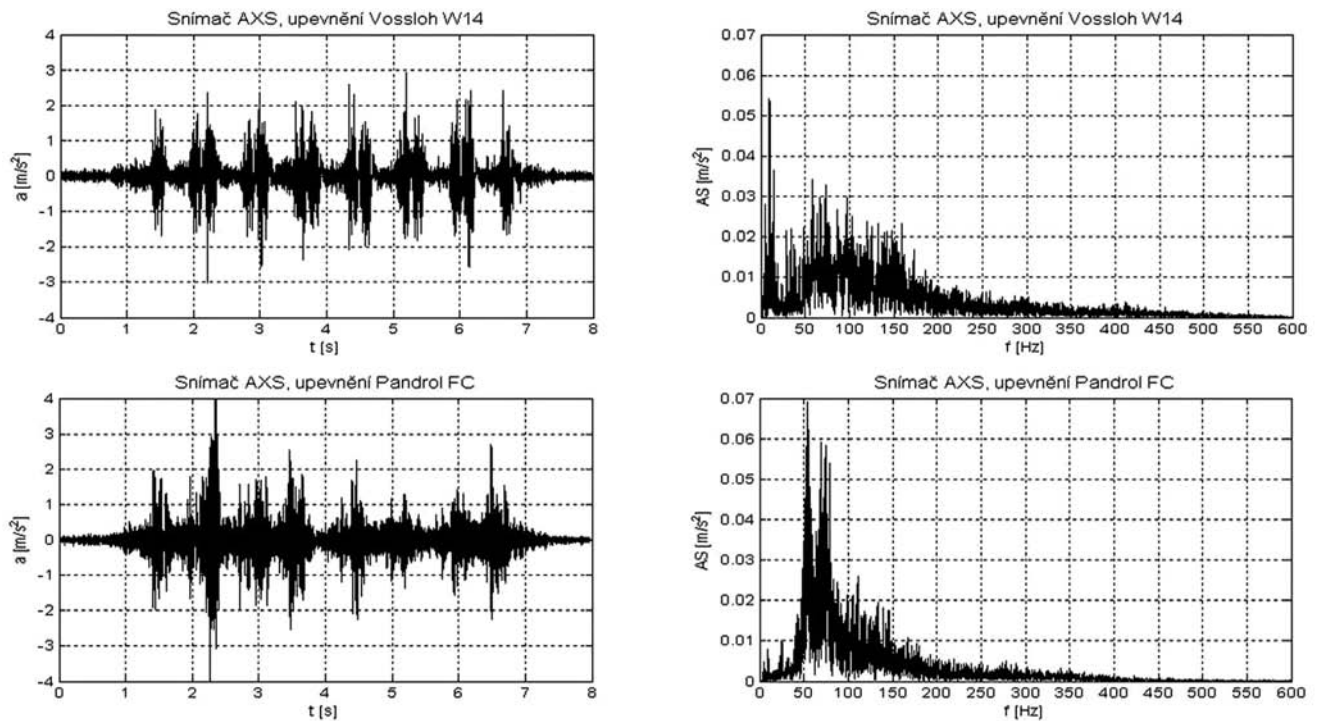
Obr. 5 – Časové průběhy zrychlení vibrací a frekvenční závislost amplitudového spektra – Hranice na Moravě; souprava SC; upevnění Vossloh W 14



Obr. 6 – Časové průběhy zrychlení vibrací a frekvenční závislost amplitudového spektra – Hranice na Moravě; souprava SC; upevnění Pandrol FC I



Obr. 7 – Časové průběhy zrychlení vibrací a frekvenční závislost amplitudového spektra – Hranice na Moravě; souprava SC; srovnání příčných vibrací na patě kolejnice AXK5



Obr. 8 – Časové průběhy zrychlení vibrací a frekvenční závislost amplitudového spektra – Hranice na Moravě; souprava SC; srovnání příčných vibrací v kolejevém loži AXS

Uvedená fakta tak vypovídají o lepších tlumících schopnostech systému upevnění Pandrol FC i ve svislém a částečně i příčném směru. Na základě časové analýzy však nelze stanovit, zda utlumené složky jsou z hlediska frekvenčního působení významné pro stabilitu koleje či nikoli. Pro věrohodnou diagnostiku systémů upevnění je proto nezbytné

doplnit časovou analýzu dat také o analýzu frekvenční. Amplitudová spektra zrychlení vibrací byla vypočtena z časových průběhů dynamických účinků souprav řady 680 pomocí Fourierovy transformace.

Z amplitudového spektra signálu z paty kolejnice AZK2 (obr. 5 a obr. 6, graf vpravo nahoře) lze v pásmu nízkých frekvencí hodnotit

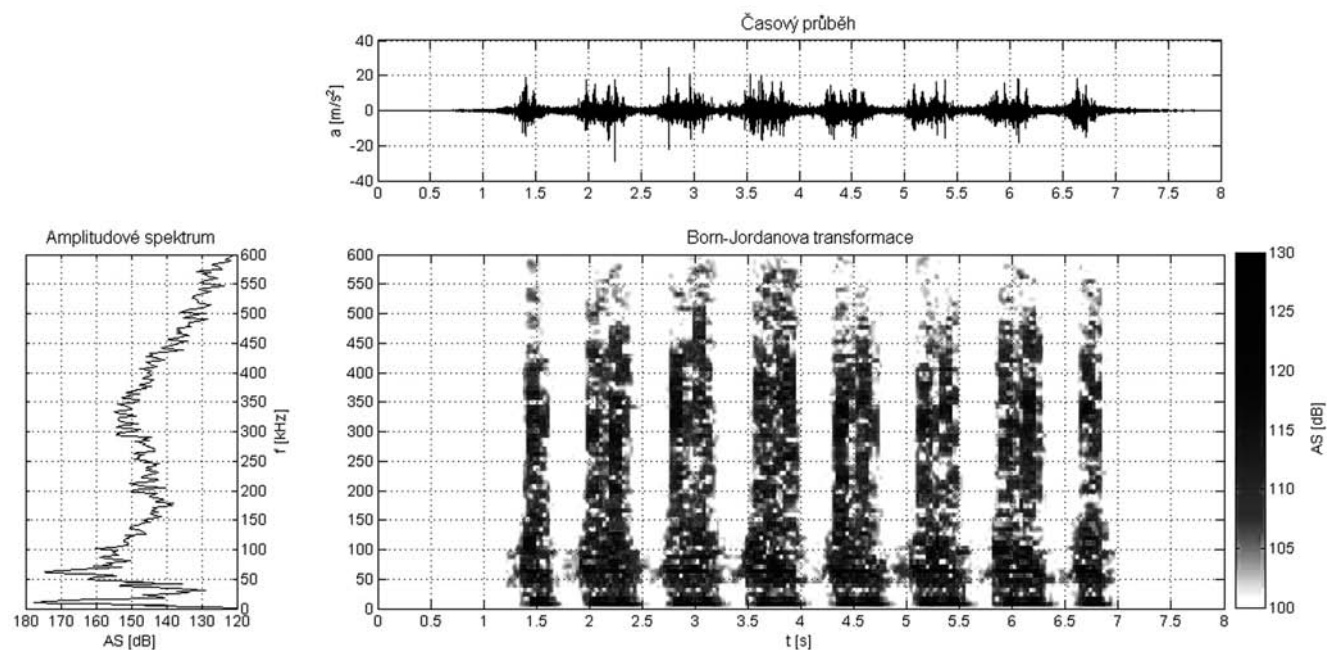
u obou typů upevnění jako výraznější frekvenci složku cca 8 Hz. Vznik této frekvence lze nejpravděpodobněji přisuzovat dynamickým účinkům podvozkové soustavy soupravy řady 680. Velikostí dosahují zrychlení vibrací při této frekvenci hodnot $0,34 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ pro konstrukci W 14, což je ve srovnání s $0,22 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ u FC I 1,5krát více. Další výrazné frekvence leží v pásmu kolem 65 Hz. V případě upevnění Vossloh jsou velikosti amplitudových spekter v této oblasti méně významné než na frekvenci 8 Hz a dosahují hodnot až $0,19 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Upevnění Pandrol vykazuje v tomto směru horší vlastnosti. Pásmo důležitých frekvencí je roztažené do větší šíře a největší amplitudy zrychlení vibrací dosahují hodnot až $0,40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, tedy dvojnásobně vyšších než na frekvenci 8 Hz. Za vznikem těchto kmitočtů zřejmě stojí působení kolové síly Q na kolejový rošt. Ve středněfrekvenční oblasti lze pro upevnění Vossloh vyzdvihnout zejména frekvenční složku 335 Hz, která je z pohledu velikosti amplitudového spektra srovnatelná s frekvencí 8 Hz. Z tohoto pohledu vychází upevnění Pandrol mnohem nepříznivěji. Výrazné amplitudy zrychlení vibrací až $0,48 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ lze nalézt v širokém pásmu frekvencí $300 \div 510 \text{ Hz}$. Podotkněme, že velikost amplitud ve středněfrekvenčních pásmech je ovlivněna zejména rychlostí jedoucího vozidla a mírou imperfekcí na pojižděných plochách železničních kol a kolejnicových pásů.

Příčné vibrace na patě kolejnice AXK5 (obr. 7, grafy napravo) se u upevnění W 14 v pásmu nízkých kmitočtů nejvíce projevují opět blízko frekvence 8 Hz. Frekvenční složky zrychlení zde dosahují hodnot až $0,65 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, což je téměř dvojnásobně více než ve svislém směru. U upevnění FC I lze hovořit o zajímavých frekvencích 8 Hz a dále pak v pásmu kolem kmitočtů 60 Hz resp. 70 Hz. Amplitudy na těchto frekvencích dosahují shodně hodnot do $0,11 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, tedy výrazně méně než při vertikální odezvě. V rozšířené středněfrekvenční oblasti můžeme pro konstrukci Vossloh zmínit důležitá pásma frekvencí $250 \div 450 \text{ Hz}$ (amplituda cca $0,50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ s extrémem $0,70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ na 335 Hz) resp. $580 \div 670 \text{ Hz}$ (maximální zrychlení $0,29 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$). U Pandrolu se stěžejní frekvence pohybují v pásmech $360 \div 400 \text{ Hz}$, $460 \div 500 \text{ Hz}$, $600 \div 690 \text{ Hz}$ (amplituda shodně $0,45 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ s extrémem $0,52 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ na 690 Hz) a v pásmu $860 \div 900$ (maximální zrychlení $0,34 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$). Z celkového po-

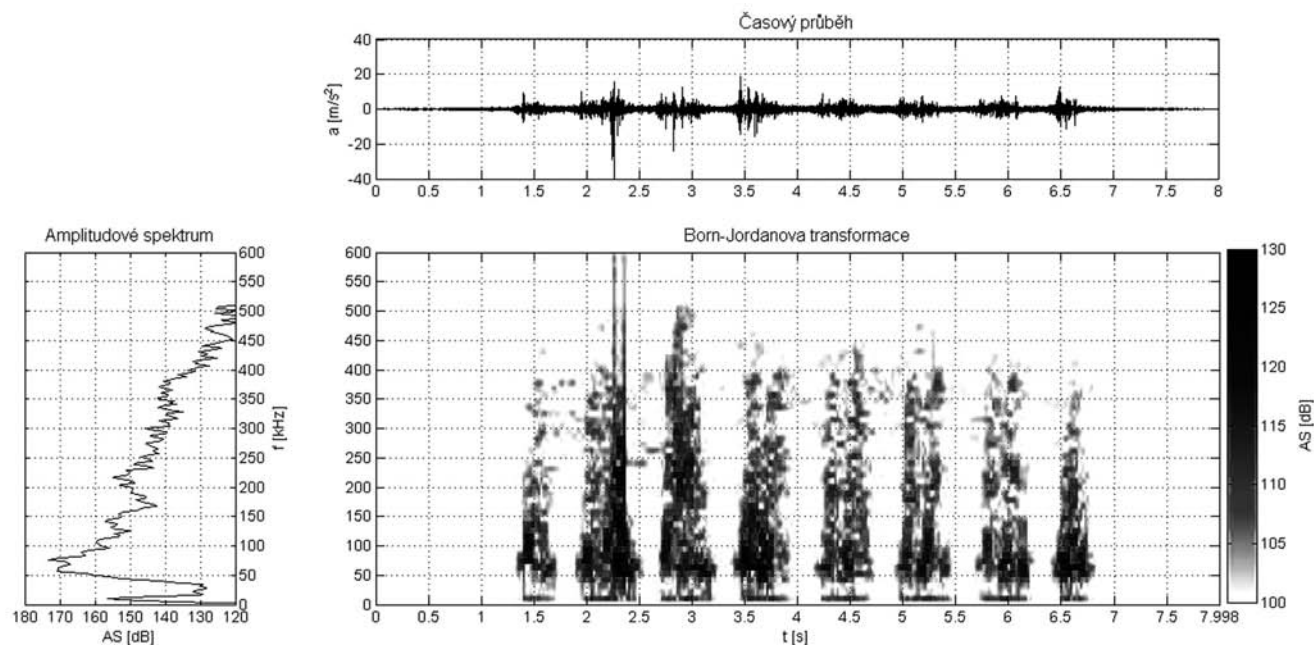
hledu lze, i přes diametrálně odlišné chování srovnávaných typů upevnění, konstatovat co do velikosti přibližně stejnou dynamickou odezvu kolejnice na pohybující se zatížení. Upevnění FC I má pouze nejdůležitější amplitudy posunuty na vyšší kmitočty. Důležité složky zrychlení jsou zároveň rovnoměrně rozloženy do širšího frekvenčního pásma než v případě konstrukce W 14.

Z pásma nízkých kmitočtů lze z hlediska svislých zrychlení vibrací na pražci AZP2 (obr. 5 a obr. 6, graf vpravo dole) určit jako stěžejní obdenné frekvence resp. pásma frekvencí jako na patě kolejnice. U Vosslohu W 14 lze při frekvenci 8 Hz na kolejnici vypočítovat zrychlení $0,34 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ resp. amplitudu na pražci s nepatrně nižší hodnotou $0,29 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Oproti tomu vykazuje upevnění Pandrol FC I téměř 1,6násobné hodnoty zrychlení vibrací na kolejnicovém pásmu než na hlavě pražce ($0,14 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$). Lepší tlumící vlastnosti konstrukce Pandrol v pásmu nízkých kmitočtů potvrzují i velikosti amplitud při frekvencích blízko 65 Hz. Jmenovitě se jedná o zrychlení $0,19 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ a $0,15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ (Vossloh kolejnice vs. pražec) resp. zrychlení $0,40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ a $0,17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ (Pandrol kolejnice vs. pražec). V pásmu středních frekvencí nedosahují amplitudy zrychlení vibrací tak vysokých hodnot jako u nízkých kmitočtů. Jako nejvýraznější se jeví u obou upevnění shodně kmitočty v pásmu od $80 \div 150 \text{ Hz}$. Maximální amplitudy zde však zpravidla nepřekračují hodnoty $0,06 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

Pro příčné vibrace v kolejovém loži AXS (obr. 8, grafy napravo) vychází u upevnění W 14 charakteristická zejména nízká frekvence 8 Hz ($0,054 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$) resp. pásmo frekvencí $55 \div 75 \text{ Hz}$ ($0,035 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$). Pro upevnění FC I jsou charakteristické frekvence, které leží v kmitočtovém pásmu $50 \div 75 \text{ Hz}$ ($0,069 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$). Amplitudy zrychlení vibrací s rostoucími středními frekvencemi prudce klesají. Za jediné významnější frekvence lze považovat kmitočty v pásmu $80 \div 150 \text{ Hz}$, shodně pro oba konstrukční typy upevnění. Frekvenční analýzou vibrací šířících se kolmo k ose koleje ve šterkovém loži bylo při průjezdu soupravy řady 680 zjištěno výhodnější chování upevnění Vossloh W 14. Autoři se na základě dalších analýz domnívají, že dané zjištění však nelze obecně paušalizovat pro ostatní železniční vozidla. Proti jednoznačně hovoří výsledky časové analýzy uvedené v tab. 2 a také závěry z měření [8].



Obr. 9 – Časově – frekvenční transformace – Hranice na Moravě; souprava SC; snímač na hlavě pražce AZP2; upevnění Vossloh W 14



Obr. 10 – Časově – frekvenční transformace – Hranice na Moravě; souprava SC; snímač na hlavě pražce AZP2; upevnění Pandrol FC I

Z důvodu získání komplexních informací o vlastnostech obou typů upevnění bylo vyhodnocení naměřených dat doplněno o časově-frekvenční analýzu. Jedná se o prostorovou problematiku, která nám umožňuje získat představu o velikosti amplitudového spektra v průřezu jednotlivých frekvencí a zároveň časovou lokalizaci těchto frekvencí. Pro účely tohoto příspěvku byla vybrána Born – Jordana časově – frekvenční transformace aplikovaná na signálu z hlavy pražce AZP2. Jde o transformaci, která je svými vlastnostmi výhodná pro analýzu vibračních signálů tohoto typu. Obr. 9 a obr. 10 představují trojici navzájem svázaných grafů, tzv. „trojčata“. Je na nich zobrazena trojice grafů – časový průběh odezvy na dynamické zatížení (graf nahoře), frekvenční rozložení amplitudového spektra v logaritmické stupnici (graf vlevo dole) a 2D hustotní spektrogram čas – frekvence – amplituda (graf vpravo dole). Podotkneme, že amplitudové spektrum (graf vlevo dole) bylo transformováno z časového průběhu zrychlení vibrací tzv. Welchovou metodou.

Tyto grafy prakticky potvrzují již popisovaná zjištění. Spektrum barev 2D hustotního spektrogramu názorně dokládá, že pražec vystrojený systémem Vossloh W 14 je více exponován vibračními jevy, než pražec s upevněním Pandrol FC I. Zde však v čase 2,4 s došlo k blíže nevysvětlenému chování, které zapříčinilo prudký nárůst zrychlení vibrací v pásmu kmitočtů 50 ÷ 290 Hz. Je zřejmé, že se nejedná o odezvu na poruchu křivosti oběžné plochy železničního kola (tzv. ploché kolo), protože obdobný nárůst nebyl zaznamenán na patě kolejnice. Uvedený jev tak mohl částečně ovlivnit šíření vibrací ve šterkovém loži, což by vysvětlovalo poněkud nestandardní chování soupravy SC vůči ostatním železničním vozidlům pohybujícím se v koleji s upevněním Pandrol, viz tab. 2.

ZÁVĚR

Provedená provozní dynamická měření v úsecích s pružným bezpodkladnicovým upevněním Vossloh resp. Pandrol ukazují, jak zásadní vliv na dynamické chování koleje v oblouku má technický stav a konstrukční uspořádání kolejových vozidel. Soupravy řady 680 resp. hnací vozidla řady 151 v tomto ohledu dopadly nejlépe, přestože

rychlosti těchto vlaků byly prakticky nejvyšší. Ani tak ale nelze vliv rychlosti považovat za zanedbatelný, což je patrné zejména z měřícího úseku upevnění FC I.

Ve srovnání obou typů upevnění lze obecně říci, že konstrukce FC I zapříčinuje výraznější odezvu kolejového roštu na svislé dynamické účinky. Z pohledu významnosti amplitudového spektra na patě kolejnice je to patrné zejména v blízkosti nízké frekvence 65 Hz (působení kolové síly Q) a v širokém pásmu středních frekvencí 300 ÷ 510 Hz. Ve směru kolmém na osu koleje dochází k zajímavému posunu důležitých amplitud směrem k vyšším frekvencím (zejména u upevnění Pandrol). Jen s obtížemi lze stanovit působíště vodící síly. To ale může být zapříčiněno typem porovnávaného vozidla. Případnou aktivací naklápěcího systému souprav řady 680 by totiž došlo k zásadní redukci vodící síly. Zatímco příčné vibrace vycházejí u upevnění Vossloh větší než svislé, u upevnění Pandrol je tomu právě naopak. Ve srovnání obou upevnění z hlediska příčných vibrací na patě kolejnice vykazuje upevnění Pandrol dokonce lepší vlastnosti než Vossloh. Vlivem příznivějších útlumových vlastností upevnění FC I dochází k přenosu energeticky méně významné (méně než poloviční) vibrační složky do podpory a dále do kolejového lože než u W 14. Popisovaný jev může být způsoben nižší tuhostí upevnění Pandrol jako celku. To nejpravděpodobněji souvisí se speciální podložkou pod patu kolejnice upravenou do podoby několika řad individuálně stlačitelných válečků. Tlumící schopnosti obou upevnění výrazně stoupají s rostoucími frekvencemi nad 200 Hz.

Nutno poznamenat, že uvedená měření probíhala při teplotách blízkých se upínací teplotě pro zřizování bezстыkové koleje.

Z těchto důvodů kolektiv autorů proto doporučuje v uvedených měřeních a analýzách dále pokračovat a zaměřit se na úseky se zcela shodnými geometrickými parametry koleje a s referenční kolejovou dopravou. Jelikož jsou nastavené podmínky v hlavních železničních trasách České republiky jen těžko splnitelné, autoři doporučují zvážit možnosti využití zkušebního centra Železniční zkušební okruh Výzkumného ústavu železničního v Cerhenicích.

Závěrem je možné konstatovat, že prezentovanou metodiku lze úspěšně aplikovat na různé typy konstrukcí železničního i tramvajového svršku. Může se stát podkladem pro výběr a srovnání zejména nových součástí kolejového svršku. Poskytuje nový detailnější pohled na přechodové a nestacionární charakteristiky a tím poskytuje cenné poznatky pro důkladnou analýzu těchto konstrukcí, která může být důležitá pro následnou optimalizaci stavebních a provozních podmínek. Nezanedbatelná je i skutečnost, že moderním matematickým aparátům analyzované dynamické zatížení železničních konstrukcí poskytuje reálné vstupy pro následné sestavení matematických modelů a tedy také lepší pochopení probíhajících dějů v kolejovém svršku.

Publikovaných výsledků bylo dosaženo za podpory projektu č. 103/07/0183 GAČR a výzkumného záměru MSM 0021630519, *Progressivní spolehlivě a trvanlivě nosné stavební konstrukce.*

prof. Ing. Jaroslav Smutný, Ph.D.,
smutny.j@fce.vutbr.cz,

Ing. Vladimír Tomandl,
tomandl.v@fce.vutbr.cz,
Ústav železničních konstrukcí a staveb,
Fakulta stavební VUT v Brně

prof. Ing. Luboš Pazdera, CSc.,
pazdera.l@fce.vutbr.cz,
Ústav fyziky,
Fakulta stavební VUT v Brně



prof. Ing. Jaroslav Smutný, Ph.D.

Je absolventem Fakulty elektrotechnické VUT v Brně. Od roku 1990 je zaměstnán na Fakultě stavební VUT v Brně. V roce 2009 byl jmenován profesorem pro obor Konstrukce a dopravní stavby. Je členem významných profesních společností, např. České akustické společnosti, České asociace pro geoinformace a společnosti sdružující aktivní uživatele časové frekvenčních metod signálové analýzy Time & frequency user club National Physical Laboratory. Je odborníkem v oblasti měřících metod a techniky, dále v problematice hluku a vibrací od dopravy. Zabývá se také problematikou aplikace umělé inteligence, dopravní telematiky a GIS. V rámci svého zaměření spolupracuje s průmyslovými podniky působícími v oblasti silniční a železniční dopravy.

Je absolventem Fakulty elektrotechnické VUT v Brně. Od roku 1990 je zaměstnán na Fakultě stavební VUT v Brně. V roce 2009 byl jmenován profesorem pro obor Konstrukce a dopravní stavby. Je členem významných profesních společností, např. České akustické společnosti, České asociace pro geoinformace a společnosti sdružující aktivní uživatele časové frekvenčních metod signálové analýzy Time & frequency user club National Physical Laboratory. Je odborníkem v oblasti měřících metod a techniky, dále v problematice hluku a vibrací od dopravy. Zabývá se také problematikou aplikace umělé inteligence, dopravní telematiky a GIS. V rámci svého zaměření spolupracuje s průmyslovými podniky působícími v oblasti silniční a železniční dopravy.



Ing. Vladimír Tomandl

Je absolventem oboru Konstrukce a dopravní stavby prezenční formy magisterského studia Fakulty stavební VUT v Brně, kde od roku 2008 pokračuje v postgraduálním studiu na Ústavu železničních konstrukcí a staveb. V roce 2007 vstoupil do Výzkumného Ústavu Železničního, a. s., kde pracuje jako specialista pro železniční infrastrukturu. Těžištěm jeho práce je železniční interoperabilita a posudková činnost.

Je absolventem oboru Konstrukce a dopravní stavby prezenční formy magisterského studia Fakulty stavební VUT v Brně, kde od roku 2008 pokračuje v postgraduálním studiu na Ústavu železničních konstrukcí a staveb. V roce 2007 vstoupil do Výzkumného Ústavu Železničního, a. s., kde pracuje jako specialista pro železniční infrastrukturu. Těžištěm jeho práce je železniční interoperabilita a posudková činnost.



prof. Ing. Luboš Pazdera, CSc.

Je profesorem v oboru Fyzikální a stavebně materiálové inženýrství na Vysokém učení technickém (VUT) v Brně. Absolvoval obor Regulační, přístrojová a automatizační technika na VUT v Brně. Od roku 1988 je zaměstnán na Stavební fakultě VUT v Brně. Je členem České společnosti pro nedestruktivní testování. Je akademickým pracovníkem na Ústavu fyziky Fakulty stavební VUT v Brně. V rámci svého zaměření spolupracuje s průmyslovými podniky působícími v oblasti výroby železničních dvojkolí a železničních pražců.

Je akademickým pracovníkem na Ústavu fyziky Fakulty stavební VUT v Brně. V rámci svého zaměření spolupracuje s průmyslovými podniky působícími v oblasti výroby železničních dvojkolí a železničních pražců.

LITERATURA:

- [1] Vyhláška Ministerstva dopravy České republiky č. 352/2004 Sb., o provozní a technické propojenosti evropského železničního systému. Ve znění pozdějších předpisů
- [2] ČD DDC č.j. 60 555/99-013. Obecné technické podmínky dodací pro upevnění kolejnic. České dráhy, s.o. Účinnost od 1. 1. 2000
- [3] ČSN 73 6360-1. Konstrukční a geometrické uspořádání koleje železničních drah a její prostorová poloha – část 1: Projektování. Český normalizační institut, říjen 2008. 52 s.
- [4] Škach A. a kolektiv: Technická příručka traťového hospodářství ČSD. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1971. 416 s.
- [5] Směrnice GR SŽDC č. 28/2005. Koncepce používání jednotlivých tvarů kolejnic a typů upevnění v kolejích železničních drah ve vlastnictví České republiky
- [6] Smutný J., Tomandl V., Pazdera L.: Dynamická a akustická analýza pružného upevnění kolejnic bez podkladnic. Stavební obzor 8/2009. ČVUT Praha. ISSN 1210-4027
- [7] Smutný J., Pazdera L.: Modern methods of noise and vibration analysis applied to rail transport. 60. výročí Stavební fakulty STU v Bratislavě. STU v Bratislavě. 1998. ISBN 80-227-112
- [8] Tomandl V.: Analýza dynamických parametrů kolejnicových upevnění. Diplomová práce. Fakulta stavební. VUT Brno. 2007. 145 s., 204 s. příl., vedoucí práce J. Smutný

RECENZE

Ucelený příspěvek pojednává o dynamickém chování kolejnicového upevnění. Je zaměřen na srovnání dvou typů pružných bezpodkladnicových upevnění požívaných na koridorových tratích v České republice. Srovnání je provedeno na základě měření zrychlení vibrací přímo in situ. Srovnávanými typy upevnění jsou Vossloh W 14 a Pandrol FC I. Příspěvek se soustředí na studium dynamického chování obou typů upevnění při průjezdu vlakových souprav směrovým obloukem s převýšením. Je rozdělen do několika logicky navazujících kapitol. Obsahuje teoretické předpoklady, věnuje se výběru měřících míst, popisuje použitý matematický aparát a konečně popisuje získaná data, hodnotí a srovnává.

Text je po odstranění drobných připomínek vznesených v rámci osobní konzultace s jedním z autorů odborně i pravopisně čistý a jasný. Popisovaná problematika je z pohledu moderní železnice vysoce aktuální. Za velký přínos považují inovativní přístup k dané problematice a použití moderních vyhodnocovacích metod, které mohou velmi napomoci ke zvýšení znalostí o dynamickém chování železničního svršku jako celku.

Celý příspěvek je na požadované úrovni a lze tak plně doporučit ke zveřejnění.

Ing. Ivan Vukušič,
vukusici@cdivuz.cz,
specialista pro železniční infrastrukturu,
VUZ – Výzkumný ústav železniční, a. s.

Dynamic effect of the railway transport on track grid with elastic rail coupling when passing the radius

The article deals with measuring, analysis and comparison of dynamic parameters of elastic ballast-free rail fastening of Vossloh W 14 and Pandrol FC I placed in the rail in the direction radius. The measuring was performed in situ according to especially created methodology using a suitable mathematical apparatus for assessing the measures parameters. Another goal of the works was to obtain the results suitable for specifying the calculation models of components for the railway superstructure.