SOUČASNÉ PROBLÉMY V KOLEJOVÝCH VOZIDLECH

XXVII. konference s mezinárodní účastí
17.–19. září 2025, Česká Třebová

ON-BOARD DIAGNOSTIKA DYNAMICKÉ ODEZVY KOL KOLEJOVÝCH VOZIDEL

ON-BOARD DIAGNOSTICS OF DYNAMIC RESPONSE OF RAILWAY VEHICLE WHEELS

Jakub VÁGNER[1], Petr VOLTR[2], Jiří ŠLAPÁK[3], Martin KOHOUT[4], Pavel SÁLA[5], Vasyl STRAZHNYK[6]

e-ISBN: 978-80-7560-564-1
DOI: 10.46585/spkv20252707
ISSN: 3029-8342
CC BY

Abstrakt

Monitoring stavu jízdní plochy kol kolejových vozidel je důležitý nejen pro bezpečný provoz vozidla, ale také z důvodu redukce emisí hluku a vibrací při jízdě vozidla. Poruchový stav kola však nelze zjistit statickou prohlídkou vozidla, ale pouze hodnocením dynamické odezvy za jízdy, která je výsledkem interakce vozidla a koleje. Článek prezentuje výsledky simulace dynamické odezvy pomocí dvou typů zjednodušených modelů a porovnání s daty měřenými v reálném provozu.

Klíčová slova

kolejové vozidlo, ploché kolo, diagnostika, vibrace

Abstract

Condition monitoring of railway vehicle wheels is important not only for the safe operation of the vehicle, but also for reducing noise and vibration emissions during operation. However, wheel defects cannot be detected through static inspection alone; they can only be identified by evaluating the dynamic response during operation, which results from the interaction between the vehicle and the track. This paper presents the results of dynamic response simulations using two types of simplified models and compares them with data obtained under real operating conditions.

Keywords

railway vehicle, flat wheel, diagnostics, vibration

[1] **Ing. Jakub Vágner, Ph.D.**, 0000-0002-7609-6489. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra dopravních prostředků a diagnostiky. Studentská 95, 532 10 Pardubice, Česká republika, tel.: +420 466 038 931, e-mail: jakub.vagner@upce.cz

[2] **doc. Ing. Petr Voltr, Ph.D.**, 0000-0001-7516-1069. Dtto, tel.: +420 466 038 505, e-mail: petr.voltr@upce.cz

[3] **Ing. Jiří Šlapák, Ph.D.**, 0000-0001-9316-9320. Dtto, tel.: +420 466 036 443, e-mail: jiri.slapak@upce.cz

[4] **Ing. Martin Kohout, Ph.D.**, 0000-0001-9050-3194. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra dopravních prostředků a diagnostiky. Dislokované pracoviště DFJP, Pražského 547, 560 02 Česká Třebová, Česká republika, tel.: +420 466 037 427, e-mail: martin.kohout@upce.cz

[5] **Ing. Pavel Sála, Ph.D.** ŠKODA TRANSPORTATION a.s. Emila Škody 2922/1, 301 00 Plzeň, Česká republika, tel.: +420 737 207 232, e-mail: pavel.sala@skodagroup.com

[6] **Ing. Vasyl Strazhnyk**. ŠKODA TRANSPORTATION a.s. Emila Škody 2922/1, 301 00 Plzeň, Česká republika, tel.: +420 724 860 189, e-mail: vasyl.strazhnyk@skodagroup.com

1 ÚVOD

Diagnostika stavu jízdní plochy kol je důležitá jak pro provozovatele vozidla, tak pro správce infrastruktury. Technicky lze provádět diagnostiku jak z vozidla, tak z koleje, protože vady na jízdní ploše kol se projeví v interakci vozidla a koleje, a proto je odezva měřitelná jak na vozidle, tak na koleji. Obě varianty však mají své výhody a nevýhody. Při porovnání je nutné zahrnout účel diagnostiky, zda jde o optimalizaci provozu/údržby vozidla nebo o ochranu infrastruktury od zvýšené dynamické odezvy (ideálně obojí). U menších železničních provozů, jakým je metro, tramvajové tratě nebo vlečky je obvykle vlastník infrastruktury totožný s provozovatelem vozidel, což situaci zjednodušuje. V podmínkách SŽ s.o. je situace jiná, protože infrastrukturu využívá mnoho dopravců a výsledky traťové diagnostiky (zatím) správce infrastruktury běžně dopravcům neposkytuje.

Hlavní výhodou traťové diagnostiky jsou její menší pořizovací náklady, protože jedno zařízení může monitorovat celou flotilu vozidel, monitoring však může probíhat jen v místě instalace a v čase průjezdu. Pro včasnou diagnostiku tak je potřeba instalovat více zařízení a tím se zvyšují náklady na vybudování. On-board diagnostika má tu výhodu, že měření probíhá přímo na vozidle, tedy u zdroje odezvy poruchy. Nevýhodou je vliv pojížděné trati, protože interakce vozidla a koleje generuje signály, které mohou mít podobný charakter jako poruchové signály.

Z pohledu provozu a údržby vozidel je výhodné provozovat on-board diagnostiku, a to ve dvou režimech: výstražná diagnostika a trendová diagnostika. V prvním případě se jedná o detekci závažnějších poruch, a to online při provozu vozidla, kdy výsledek diagnostiky musí být znám ihned, aby mohla obsluha vlaku nebo operátor údržby zareagovat opatřením při provozu vozidla a zabránit tak případným škodám nebo snížení bezpečnosti nebo kvality provozu. U trendové diagnostiky jde o vyhodnocení časových řad měřených v delším časovém úseku, které pak umožní optimalizaci provozu, ale zejména pak optimalizaci údržby vozidla.

Cílem projektu Onboard diagnostika pojezdu kolejových vozidel je, mimo jiné, vytvořit přenosný HW pro on-board diagnostiku použitelnou pro ad-hoc měření za účelem ověření stavu pojezdu při zkušební jízdě. Dalším cílem je vytvořit algoritmus pro detekci poruch pojezdu, který by byl implementovatelný do již existujících diagnostických systémů.

Tento příspěvek popisuje požadavky na sběr dat na vozidle tak, aby bylo možné realizovat on-board diagnostiku, a dále popisuje teoretický rozbor dynamické odezvy vybrané vady pomocí dvou simulačních modelů včetně porovnání simulací s daty naměřenými v reálném provozu.

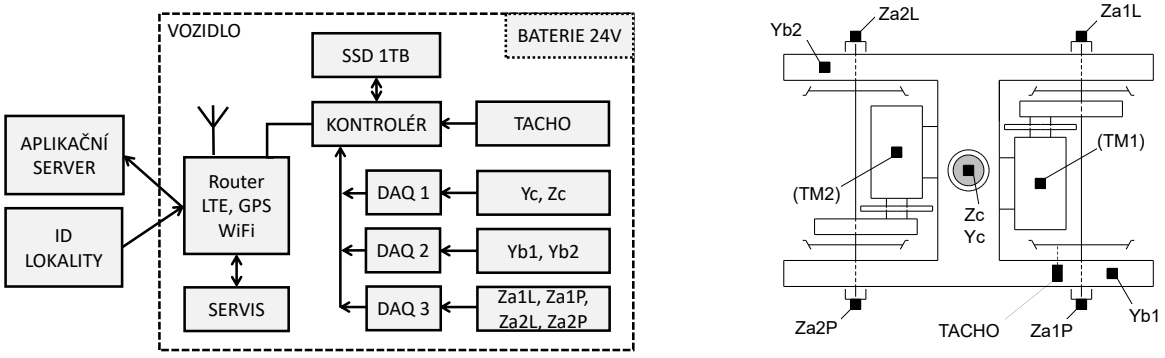
2 SPECIFIKA ONBOARD DIAGNOSTIKY PŘI SBĚRU DAT

Diagnostika pojezdu kolejových vozidel se od diagnostiky stacionárních strojů odlišuje v několika zásadních oblastech, která ovlivňuje požadavky na parametry snímačů, měřicí řetězec i zpracování dat. Jedná se zejména o následující rozdíly:

- **Pojezd kolejových vozidel představuje složitý mechanický systém** (dvojkolí, vypružení a tlumení, ložiska, komponenty brzdy, případně i trakční motor s nápravovou převodovku, kloubové spojky, kloubový hřídel). Kromě kombinovaného mechanického zatížení dochází často k rušení signálu od elektrického pohonu v případě trakčních podvozků.
- **Interakce vozidlo–kolej.** Dynamická odezva železničního svršku má výrazný vliv na charakter signálů měřených na vozidle (zejména na ložiskové skříni). Problémem může být také maskování frekvencí monitorovaných částí systému (např. zubová frekvence převodovky a vlastní frekvencí kmitání kolejnic). Možnost eliminace vlivu trati je ovlivněna také schopností přesné lokalizace vozidla.
- **Vliv provozních podmínek a pracovního režimu.** Kolejová vozidla pracují v různém režimu (stání, jízda, brzda, trakce), pohybují se různou rychlostí, při různém ložení/obsazenosti. Většinu z těchto vlivů je potřeba eliminovat, ale všechny vlivy nelze exaktně měřit.

- **Management sběru dat nelze založit na intervalovém měření**, které se používá u stacionárních strojů, protože vozidlo pracuje nerovnoměrně v čase, v různých provozních režimech a na různých vozebních ramenech. Zároveň je kladen důraz na lokální zpracování dat na vozidle z důvodu včasné výstražné diagnostiky obsluze vlaku a snížení objemu přenášených dat pro trendovou diagnostiku.

Se zohledněním výše uvedených požadavků byl navržen mobilní měřicí systém, který je možné zjednodušeně popsat dle obr. 1 vlevo. Centrální částí diagnostiky je také kontrolér, zajišťující sběr dat z jednotlivých DAQ, triggerování startu a konce měření, základní předzpracování dat a komunikaci s dalšími moduly pro přenos dat z vozidla na server, lokalizaci na trati a komunikaci serveru s kontrolérem (dohled). Požadavkem na zařízení jsou galvanicky izolované měřící kanály, nízká spotřeba, možnost napájení přímo z baterie (10-30 V), rozlišení ADC 24bit z důvodu velké variability signálu a informace o rychlosti z vlastního snímače otáček (nezávisle na systémech vozidla).



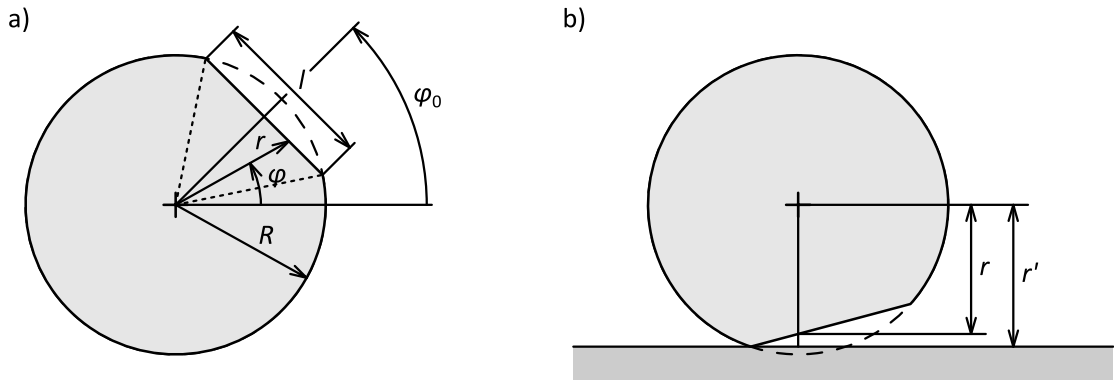
Obr. 1 Schéma zařízení mobilní diagnostiky pojezdu (vlevo) a umístění snímačů (vpravo)

Senzorickou část tvoří snímače zrychlení vlastní výroby umístěné na mechanických částech vozidla, doplněné o senzor otáček dvojkolí (rychlosti jízdy), viz obr. 1 vpravo.

3 SIMULACE DYNAMICKÉ ODEZVY ŽELEZNIČNÍHO KOLA S VADOU

3.1 Popis simulačního modelu kola s vadou (plocha)

Jednou ze základních vad kola, kterou lze analyzovat na základně dynamické odezvy za jízdy, a naopak v případě statické analýzy není vždy detekovatelná, je vada plochého kola. Tato vada je charakteristická rázovou odezvou zejména ve svislém směru; odezvy v ostatních směrech jsou měřitelné, ale slabší. Simulační výpočty tak lze zredukovat na zjednodušený fyzikální model vozidla pouze ve svislém směru. V případě, že se na obvodu kola nachází pouze jedna tato vada, bude perioda opakování dynamické odezvy odpovídat právě frekvenci otočení kola.



Obr. 2 Geometrie rovné vady plochého kola (a); situace při vychýlení kontaktního bodu kolo–kolejnice oproti středu kola (b)

Geometricky lze vadu plochého kola zjednodušeně uvažovat jako kruhovou úseč. Poloměr kola r v této části obvodu lze popsat funkcí úhlu φ jako sečnu, která odpovídá úbytku materiálu kola a je charakteristická svou délkou l:

$$r(\varphi) = \frac{\sqrt{R^2-(l/2)^2}}{\cos(\varphi-\varphi_0)} \qquad \text{pro } |\varphi-\varphi_0| < \arcsin\left(\frac{l}{2R}\right). \tag{1}$$

Graficky je tato geometrie znázorněna na obr. 2 a). Pro okamžitý pohyb kola je však rozhodující poloměr $r' \leq r$, viz obr. 2 b). Proto pokud geometrie vstupuje do simulace jako kinematické buzení svislého pohybu kola, je nutné pro její předpis ještě provést přepočet míry $r(\varphi)$ na $r'(\varphi)$.

3.2 Zvolené simulační metody

V rámci simulačních výpočtů zaměřených na analýzu dynamické odezvy průjezdu kola s vadou plochého kola byly uvažovány dva rozdílné přístupy. Parametry modelu vozidla v obou přístupech přibližně odpovídají hnacímu vozidlu metra Škoda 21Mt (viz tab. 1). Model byl rovinný (v rovině X-Z) a zahrnoval jen části příslušné jednomu kolu (kolo, čtvrtina rámu podvozku a osmina skříně), neboť měkké vypružení tvoří jen velmi slabou vazbu mezi koly. Přístupy se liší v modelování kontaktu kolo–kolejnice, samotné kolejnice a jejího uložení.

Tab. 1 Přehled vstupních parametrů pro model vozidla

			vztaženo na jedno kolo		
hmotnost dvojkolí	[kg]	1400	tuhost primárního vypružení	[kN/mm]	1,239
hmotnost podvozku	[kg]	3200	tuhost sekundárního vypružení	[kN/mm]	0,226
hmotnost prázdné skříně vozidla	[kg]	17600	tlumení primárního vypružení	[kNs/m]	15
poloměr kola	[mm]	422,5	tlumení sekundárního vypružení	[kNs/m]	20

V prvním přístupu je uvažován **model tuhé kolejnice** s pražcem (části koleje), který se pohybuje souběžně s modelem vozidla. Hmotnost tohoto tělesa je nastavena na 165 kg a parametry jeho lineárního uložení jsou uvedeny v tab. 2. Model je vytvořen v programu MATLAB/SIMULINK pomocí balíčku SIMSCAPE, pro model kontaktu kolo–kolejnice je použit prvek *Spatial Contact Force*, jehož parametry jsou také uvedeny v tab. 2. Specifickým prvkem tohoto přístupu je model kola, u kterého je definována jeho obvodová geometrie včetně vady a simuluje se přímo odvalování kola po kolejnici.

Tab. 2 Přehled uvažovaných parametrů modelu tuhé kolejnice a kontaktu kolo-kolejnice

uložení části koleje			**kontakt kolo–kolejnice**		
tuhost	[kN/mm]	150	tuhost	[kN/mm]	600
konstanta tlumení	[kNs/m]	150	konstanta tlumení	[kNs/m]	20

Druhý přístup pracuje s **modelem ohybově poddajné kolejnice**. Kolejnice je modelována jako pružný nosník podle Timošenkovy teorie (viz např. [3]), charakterizovaný hustotou, elastickými konstantami a průřezovými parametry. Nosník spočívá na dvouvrstvém podkladu s diskrétními podporami – pražci, přičemž jen přímo mezi kolejnicí a pražcem (na délce podkladnice) je poddajnost rozložena spojitě. Kontakt kola a kolejnice je modelován jako nelineární „hertzovská“ pružina, která přenáší sílu pouze v tlaku. Číselné hodnoty parametrů jsou uvedeny v tab. 3.

Výpočetní řešení tohoto modelu zajišťuje open-source nástroj *railFE*, dostupný z úložiště GitHub [1] a dále dokumentovaný na internetové stránce [2]. V kódu bylo nutno provést několik úprav pro správnou reprezentaci hertzovské pružiny a nerovností koleje. Nástroj využívá linearizaci systému v okolí pracovního bodu; pak lze provést výpočet ve frekvenční oblasti, anebo (s aktualizací matic tuhosti a tlumení v každém kroku) časovou simulaci.

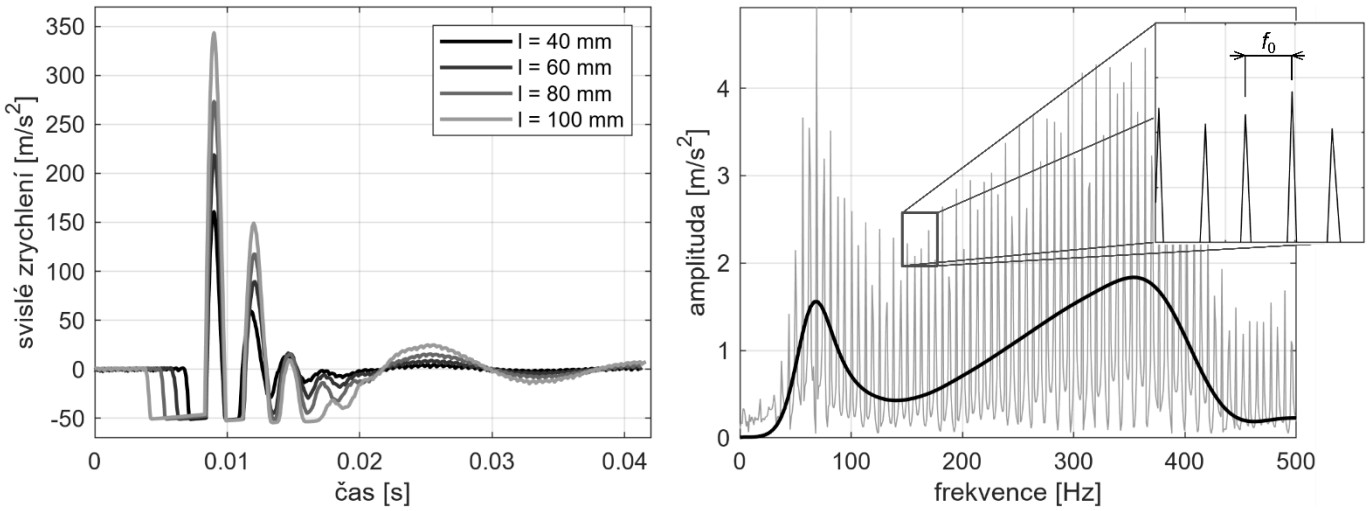
Tab. 3 Parametry modelu s poddajnou kolejnicí

parametry kolejnice			**vztaženo na jedno kolo**		
plocha průřezu kolejnice	[cm^2]	76,9	hmotnost poloviny pražce	[kg]	177,5
moment setrvačnosti průřezu	[cm^4]	3055	tuhost štěrkového lože	[kN/mm]	40
modul pružnosti – tah/tlak	[GPa]	210	tuhost podkladnice	[kN/mm]	200
modul pružnosti – smyk	[GPa]	77	tlumení štěrkového lože	[kNs/m]	47
hustota materiálu	[kg/m^3]	7850	tlumení podkladnice	[kNs/m]	28
smykový součinitel	[1]	0,38	konstanta hertzovské pružiny	[kN/(mm$^{3/2}$)]	6,0·10^4
rozestup pražců	[m]	0,6			

3.3 Výsledky simulací modelu s tuhou kolejnicí

Simulační model vozidla (viz tab. 1) a trati s tuhou kolejnicí (tab. 2) byl použit pro simulační výpočty v časové oblasti. V rámci analýzy byla variována délka vady na kole od 40 mm do 100 mm. Časový záznam svislého zrychlení na kole je zobrazen na obr. 3 vlevo. Z jednotlivých záznamů vyplývá, že velikost dynamické odezvy se zvyšuje s délkou vady na kole. Zároveň lze popis děje (záznamu) rozdělit na tři části:

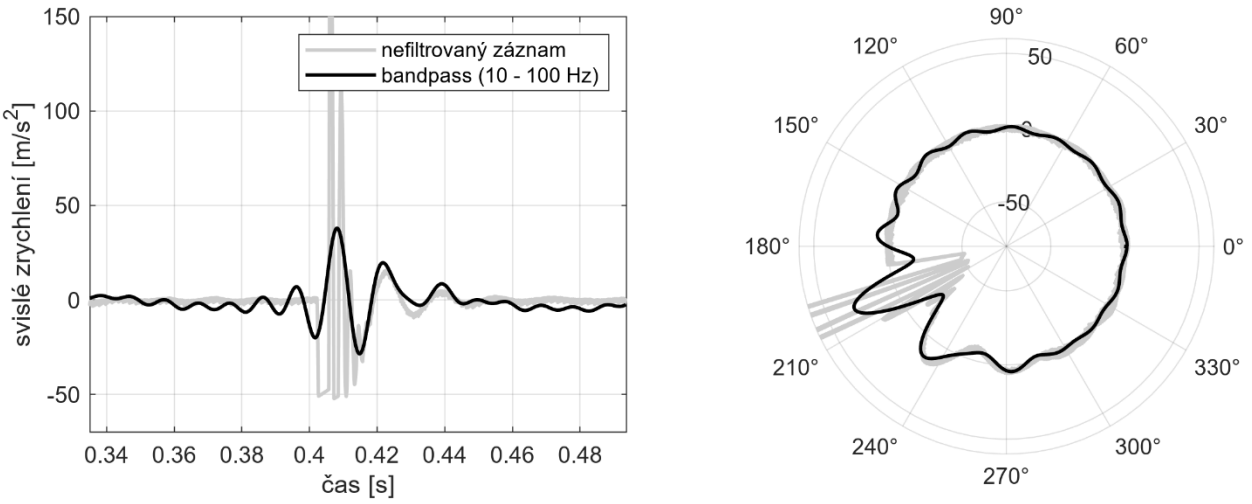
- **0,00 až 0,01 s** – najetí na vadu plochého kola, kolo ztrácí kontakt s kolejnicí a padá dolů se zrychlením daným tíhou a silou akumulovanou ve vypružení.
- **0,01 až 0,02 s** – náraz kola na kolejnici a odskakování kola od kolejnice. Tato část je charakteristická frekvencemi kmitání v pásmu 300 až 350 Hz (viz obr. 3 vpravo).
- **0,02 až 0,04 s** – Dokmitání s nižšími amplitudami a nižší frekvencí pásmu v 60 až 70 Hz (viz obr. 3 vpravo).



Obr. 3 Časové záznamy svislého zrychlení na kole pro různé délky vady (vlevo); frekvenční spektrum pro délku vady 80 mm (vpravo)

Na obr. 3 vpravo je šedou barvou zobrazen výsledek FFT (*Fast Fourier transform*) analýzy několika otáček kola, který je specifický řadou vrcholů, které jsou od sebe vzdáleny vždy o shodnou hodnotu označenou jako f_0. Tato hodnota odpovídá frekvenci otáčení kola (v tomto případě 6,28 Hz pro rychlost jízdy 60 km/h), a tedy i frekvenci výskytu vady plochého kola.

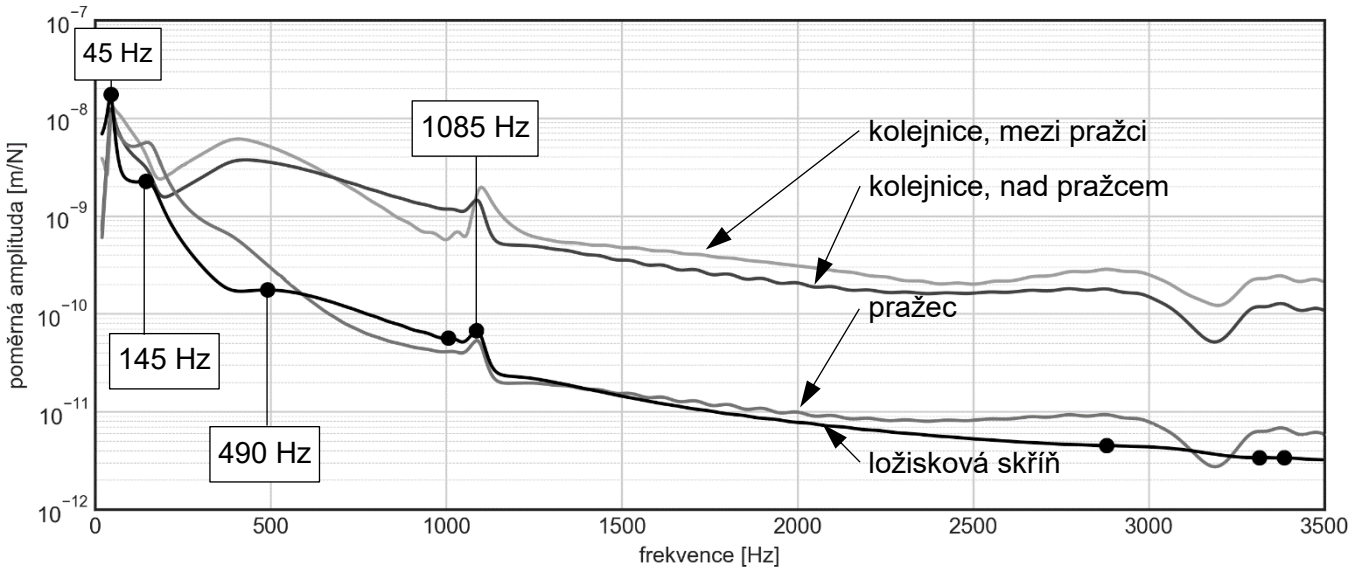
Pro vykreslení dynamické odezvy v časové oblasti (obr. 4 vlevo) lze s výhodou využít také vykreslení záznamu v polárních souřadnicích (viz obr. 4 vpravo). Takové zobrazení zvýrazní opakovatelnost odezvy vůči náhodným odezvám svislých nerovností trati (tím se zabývají např. články [6] a [7]). Na obr. 4 je tučně vykreslen signál filtrovaný pásmovou propustí v rozmezí 10 až 100 Hz, který ze signálu odstraní rychlé děje spojené s nárazem kola na kolejnici a následující odskokem, a naopak zvýrazní dokmitání s nižšími amplitudami, což je vhodné pro porovnání s měřenými daty jako např. na obr. 6 vlevo.



Obr. 4 Časové záznamy svislého zrychlení při přejezdu vady plochého kola v polárních a pravoúhlých souřadnicích (délka vady 80 mm; rychlost jízdy 60 km/h)

3.4 Výsledky simulací modelu s poddajnou kolejnicí

Model s poddajnou kolejnicí byl využit v první řadě pro výpočty ve frekvenční oblasti, kde se určuje přenosová funkce mezi svislým harmonickým buzením v určeném místě soustavy a odezvou na zvolené části (reprezentující měření zrychlení na vozidle nebo koleji) – příklad je na obr. 5.



Obr. 5 Vypočtená odezva na harmonické buzení, které má původ v kontaktu kola a kolejnice, pokud se kolo nachází v polovině vzdálenosti mezi pražci; křivky ukazují amplitudy výchylky jednotlivých hmot vztažené na jednotkovou amplitudu silového buzení v kontaktu kolo–kolejnice

Poloha vrcholů ve spektru se poněkud mění v závislosti na tom, kde je zavedeno buzení a kde se nachází kolo vozidla (nad pražcem nebo mezi pražci), kromě toho přesné hodnoty vlastních frekvencí nemají velkou informační hodnotu, neboť vrcholy jsou zmnoženy velkým počtem stupňů volnosti kolejnice diskretizované konečnými prvky. Obecně však v odezvě na kole (tj. i ložiskové skříni) lze rozeznat frekvence a tvary kmitů uvedené v tab. 4.

Čisté ohybové kmity kolejnice mezi podporami (tvar „pin-pin“), kterými se nejlépe šíří vzruchy v kolejnici [4], lze na vozidle též rozeznat, i když přítomnost hmoty dvojkolí v mezipražcovém úseku mění dynamické vlastnosti. Simulace, ve které model zahrnoval jen samotnou kolej bez vozidla, jasně ukázala vlastní frekvenci „pin-pin“ o velikosti 1070 Hz.

Tab. 4 Výsledky výpočtů s poddajnou kolejnicí ve frekvenční oblasti

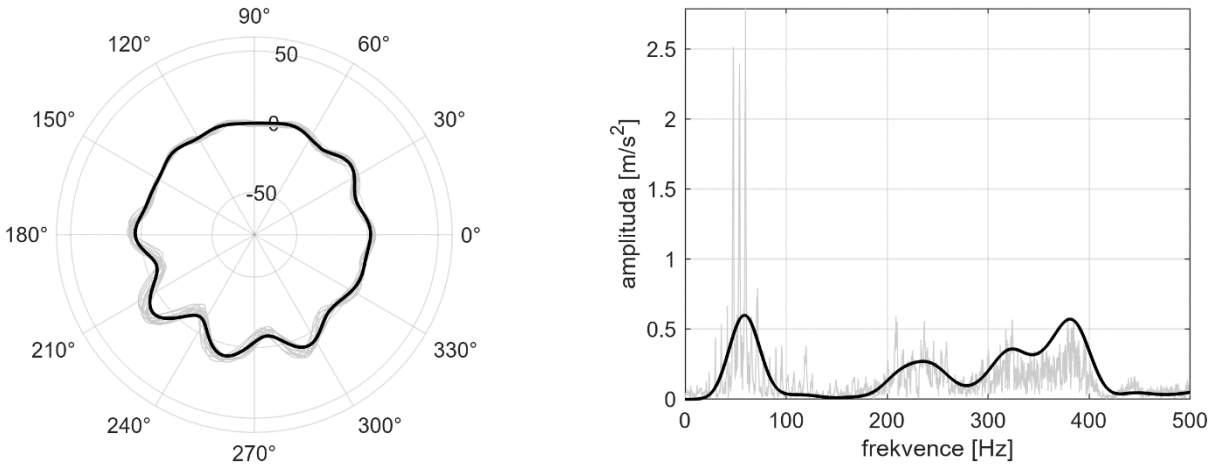
frekvence [Hz]	charakteristika
≤ 10	kmity v rámci primárního a sekundárního vypružení vozidla (nejsou vidět v grafu)
40–50	ohybové kmity kolejnice s dlouhými vlnami, všechny hmoty kmitají v téměř shodné fázi
140–150	kolo kmitá proti kolejnici, uplatňuje se zejména poddajnost v kontaktu kolo–kolejnice
400–500	kolejnice kmitá mezi pražci a kolem
≤ 1000	kmitá převážně kolejnice, s rostoucí frekvencí se mění fázové posuvy a uplatňují se kmity menších vlnových délek

Výsledky simulací v časové oblasti se kvalitativně shodují s tím, co bylo zjištěno s modelem s tuhou kolejnicí (na základě časových průběhů jako na obr. 3 vpravo). Frekvenční obsah v pásmu do 500 Hz má též stejný charakter jako na obr. 3 vlevo, ovšem poloha vrcholů je posunuta: první vrchol je na cca 45 Hz, druhý okolo 150 Hz – jak odpovídá hodnotám v tab. 4. Zdrojem nesouladu jsou odlišnosti v modelu koleje (tuhá oproti poddajné). Zde by bylo možno pro tuhou kolej hledat optimální hodnoty parametrů, zejména délku uvažovaného tuhého segmentu příslušejícího jednomu kolu, aby ve zvoleném kritériu byly rozdíly oproti přesnějšímu modelu minimální. Vzhledem k tomu, že aktuálně nejsou známy parametry skutečné koleje, ke které se simulace vztahují, tento krok realizován nebyl.

Pro srovnání byly dále využity výsledky ze simulace v programu SIMPACK, uvedené v práci [5]. Kvalitativní shoda podporuje správnost zde představených modelů, které pomáhají v pochopení původu kmitů různých frekvencí.

4 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ SIMULACÍ A REÁLNÉHO MĚŘENÍ

Pro porovnání simulací s reálným provozem byly použity data naměřené na soupravách 21Mt v podmínkách metra Varšava. Jedná se o signály svislého zrychlení měřeného na ložiskových skříních jednotlivých dvojkolí naměřená diagnostickým systémem SKF, který je na vozidlech instalován z výroby. Signál je vzorkován frekvencí 1280 Hz. Na obr. 6 lze vidět záznam svislého zrychlení na ložiskové skříni změřený v provozu vozidla typu 21Mt. Na obr. 6 vlevo je zobrazen polární diagram dvanácti otáček kola s jednou vadou (ploškou) na obvodu při rychlosti 60 km/h (šedou barvou) a jejich průměr pro každý úhel otočení (černou barvou). Graf jasně ukazuje dobrou opakovatelnost záznamů mezi otáčkami. Při porovnání s obr. 4 vpravo je vidět podobnost mezi měřením a simulací.



Obr. 6 Odezva změřená za jízdy vozidla 21Mt; vlevo polární diagram záznamu dvanácti otoček kola (filtrováno BP 10–100 Hz); vpravo FFT amplitudové spektrum záznamu

Na obr. 6 vlevo je zobrazeno amplitudové spektrum signálu, kde dominují tři frekvenční oblasti. Při porovnání se simulací (obr. 3 vpravo) lze opět najít shody, zejména v oblasti okolo 50 Hz a okolo 350 Hz. Spektrum také obsahuje špičky, které jsou na frekvenční ose od sebe vzdáleny o frekvenci totožnou s frekvencí otáčení kola.

5 ZÁVĚR

Při vývoji systému on-board diagnostiky pojezdu kolejového vozidla nestačí vybavit vozidlo měřicím zařízením a systémem pro přenos, sdružování a ukládání dat. Je nezbytné vytvořit algoritmy, postupy a nástroje, jimiž lze z dat získat požadované informace. To je úkolem výzkumu, který musí zjistit vazby mezi projevy (měřenými daty) a jejich zdroji (technickým stavem vozidla). Jelikož jednotlivé elementy tohoto systému nelze v praxi snadno řídit a izolovat, využívají se teoretické analýzy a simulační výpočty.

V tomto článku jsou představeny podmínky a výsledky simulačních metod pro hodnocení projevů jednoho konkrétního způsobu zhoršení technického stavu pojezdu vozidla – přítomnost vady (plochy) na jízdní ploše kola. Simulace ukázaly, jaké je dynamické chování kola při přejezdu jednoduše definované plochy v časové a frekvenční oblasti.

Nutno podotknout, že v provozu vznikají vady rozličných velikostí a tvarů, což může komplikovat detekci. Běžným úkazem je také více vad po obvodu kola. Provedené výpočty však ukazují, že lze nalézt obecné charakteristiky v signálu, pomocí kterých lze vady detekovat. Výstupy budou v dalším kroku použity pro návrh algoritmů detekce a kategorizace těchto vad.

Ještě je třeba zmínit dynamickou odezvu tratě, která může představovat překážku pro detekci vad kola, protože nerovnosti na trati mohou vytvářet podobné odezvy. Stále je potřeba mít na paměti, že se jedná o interakci vozidla a koleje – obě části se podílí na výsledném signálu. Znalost infrastruktury, po které vozidlo jede, je nezbytné k tomu, aby se předešlo chybným závěrům, tedy je potřeba eliminovat vliv tratě či alespoň porovnávat odezvy získané ve stejném traťovém úseku.

Výzkum byl financován se státní podporou Technologickou agenturou ČR a Ministerstvem dopravy ČR v rámci projektu *On board diagnostika pojezdu kolejových vozidel* č. CL01000243 v programu TAČR DOPRAVA 2030.

◆◆

Literatura

[1] HOELZL, C. *railFE: Simplified Vehicle Track Interaction Model.* Online. GitHub. Dostupné z: https://github.com/CyprienHoelzl/railFE/. [citováno 2025-06-02]

[2] HOELZL, C. *railFE User Guide*. Online. Dostupné z: https://railfe.readthedocs.io. [citováno 2025-06-02]

[3] JULIŠ, K., BREPTA, R. et al. *Mechanika II. díl. – Dynamika*. Technický průvodce, svazek 66. Praha: SNTL, 1987.

[4] VOLTR, P., VÁGNER, J., KOHOUT, M., HÁBA, A., LIBEROVÁ, S. *Analýza dynamického chování koleje pro účely diagnostiky pojezdu kolejových vozidel*. Zpráva DiPo-22-PV-01. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2022.

[5] VÝMOLA, L. *On-board diagnostika pojezdu kolejových vozidel*. Diplomová práce. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, 2022.

[6] ZHOU, Y., VUITTON, J., TIAN, Q., HECHT, M. Wheel flat detection by using the angular domain synchronous averaging method and axle box acceleration: Simulation and experiment. *Measurement*. Vol. 230 (2024). ISSN 0263-2241.

[7] ZHOU, Y., TIAN, Q., HECHT, M. Wheel flat detection on railway vehicles using the angular domain synchronous averaging method: An experimental study. *Structural Health Monitoring*. Vol. 23 (2024), no. 1, s. 343–359. ISSN 1475-9217.

Zasláno / received: 09. 07. 2025, přijato / accepted: 30. 07. 2025, publikováno / published: 17. 09. 2025.

Příspěvek recenzovali / The paper was reviewed by: doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc. (Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství), prof. Ing. Daniel Kalinčák, PhD. (Žilinská univerzita v Žiline, Strojnícka fakulta).