



26. MEDZINÁRODNÁ KONFERENCIA  
„SÚČASNÉ PROBLÉMY V KOLĎAJOVÝCH  
VOZIDLÁCH - PRORAIL 2023“  
20. – 22. septembra 2023, Žilina, Slovensko

<https://doi.org/10.26552/spkv.Z.2023.1.24>

## DYNAMICKÁ INTERAKCE JEDOUcíHO VOZIDLA S VÝHYBKOU DYNAMIC INTERACTION OF A MOVING VEHICLE WITH A TURNOUT

Martin KOHOUT, Jakub VÁGNER, Aleš HÁBA<sup>\*)</sup>

### 1 ÚVOD

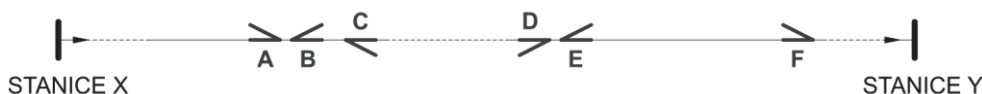
Železniční výhybky jsou z pohledu celkových nákladů na údržbu ve srovnání s běžnou kolejí problematickým prvkem infrastruktury. Silové zatěžování neodpružených částí vozidel a poškození srdcovky je dáno dynamickou interakcí jedoucího vozidla a srdcovky, které se během provozu může výrazně odlišovat od optimalizovaného stavu interakce teoretického dvojkolí a výhybky. Článek se proto zabývá analýzou výsledků měření zrychlení na vozidle, které dává komplexní obraz o dynamickém stavu výhybky a podloží a umožňuje relativní srovnání stavu výhybek stejné konstrukce.

### 2 HODNOCENÍ ODEZVY NA ZÁKLADĚ DYNAMICKÝCH ÚČINKŮ NA VOZIDLE

Základem pro relativní hodnocení stavu výhybek ze strany jedoucího vozidla je certifikovaná metodika [1]. Za účelem vývoje robustního SW pro hodnocení stavu sledovaných výhybek s využitím strojového učení byly následně vyvinuty algoritmy pro automatickou transformaci a export měřených dat, včetně doplnění relevantních metadat k provedenému měření [2].

#### 2.1 Vyhodnocení vybraných měření na vozidle

Pro příklad bylo provedeno vyhodnocení výsledků měření výhybek v jedné koleji stanice na hlavní trati (viz **obr. 1**) pro rychlosti  $160 \pm 5$  km/h (v případě průjezdu nižší rychlostí jsou tyto výsledky ve všech grafech odlišeny).



**Obr. 1** Uspořádání výhybek ve sledované stanici

**Fig. 1** Arrangement of turnouts in the observed station

Stav výhybek i projíždějícího vozidla se s opotřebením přirozeně a postupně mění, v důsledku čehož se postupně mění i svislá dynamická odezva vozidla při průjezdu

<sup>\*)</sup> **Ing. Martin KOHOUT, Ph.D.**, Katedra dopravních prostředků a diagnostiky, DFJP, Univerzita Pardubice, Pražského 547, 560 02 Česká Třebová, martin.kohout@upce.cz, interakce vozidlo/kolej, technické měření a diagnostika

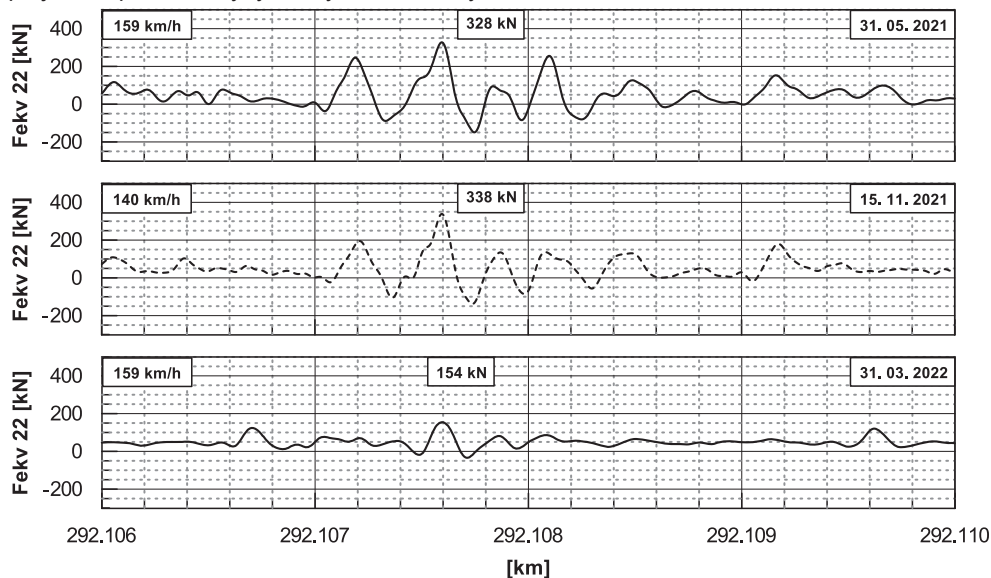
**Ing. Jakub VÁGNER, Ph.D.**, Univerzita Pardubice, DFJP, Katedra dopravních prostředků a diagnostiky, Studentská 95, 53210 Pardubice, jakub.vagner@upce.cz.

**Ing. Aleš HÁBA, Ph.D.**, Univerzita Pardubice, DFJP, Katedra mechaniky, materiálů a částí strojů, Pražského 547, 560 02 Česká Třebová, ales.haba@upce.cz.

výhybkou. V provozu však nastávají situace, kdy se stav výhybky nebo vozidla změní náhle, a to buď v důsledku vzniku poruchy nebo naopak údržbovým zásahem v koleji či na vozidle. Ve sledovaném období došlo k následujícím náhlým změnám:

- V únoru 2022 byla z důvodu lomu vyměněna srdcovka výhybky F.
- V srpnu 2022 byla reprofilována kola měřicího vozu.

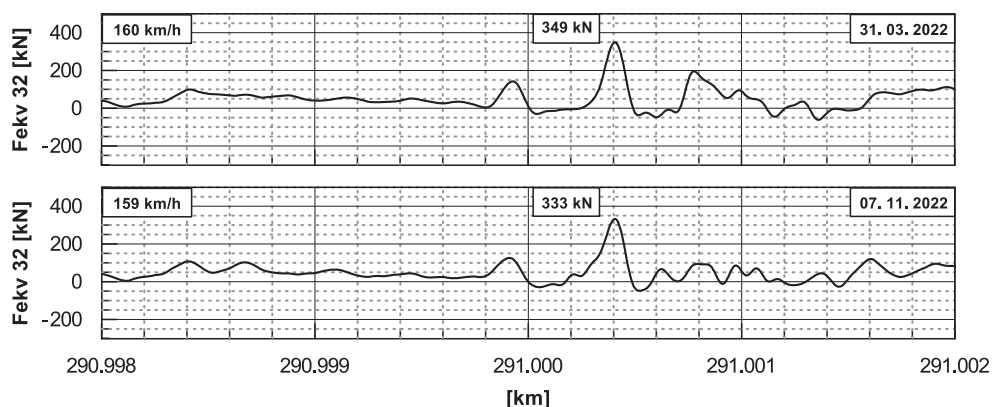
Oba tyto zásahy ovlivnily geometrii přechodu kola z křídlové kolejnice na hrot srdcovky. V grafu na **obr. 2** jsou zobrazeny průběhy ekvivalentního zatížení při průjezdu výhybkou F v březnu 2021, v listopadu 2021 a v březnu 2022. Zřetelně je zde vidět zásadní změna v průběhu ekvivalentního zatížení po výměně srdcovky. Lze si též povšimnout skutečnosti, že maximální hodnota ekvivalentního zatížení zjištěná v listopadu 2021 je srovnatelná s maximální hodnotou zjištěnou v březnu 2021, přestože v listopadu 2021 se projíždělo přes tuto výhybku výrazně nižší rychlostí.



**Obr. 2** Průběhy ekvivalentního zatížení při průjezdu výhybkou F v březnu 2021, v listopadu 2021 a v březnu 2022 (v únoru 2022 proběhla výměna srdcovky z důvodu lomu)

**Fig. 2** Courses of the equivalent loading during passing over the turnout F in March 2021, November 2021 and March 2022 (in February 2022 the frog was changed due to the fracture)

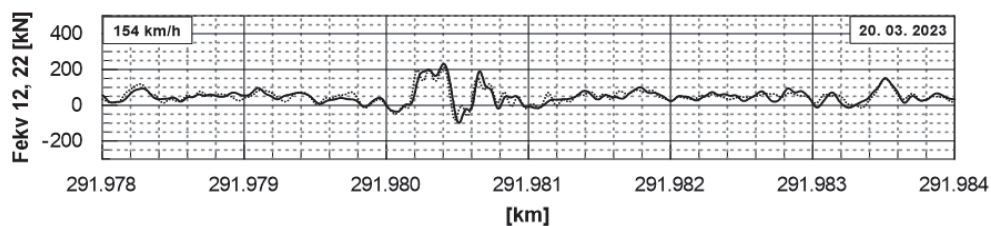
Z grafu na **obr. 3**, kde jsou zobrazeny průběhy ekvivalentního zatížení při průjezdu výhybkou C v březnu 2021 a v březnu 2022, je patrné, že reprofilace kol měřicího vozu nemá zásadní vliv na průběh a maximální hodnotu ekvivalentního zatížení.



**Obr. 3** Pr ubehy ekvivalentního zat izen ı pr ı pr ıjezdu výhybkou C v břeZnu 2021 a v břeZnu 2022 (v srpnu 2022 došlo k reprofilaci kol měřicího vozu)

**Fig. 3** Courses of the equivalent loading during passing over the turnout C in March 2021, and March 2022 (in August 2022 the wheels of the measuring coach was reprofiled)

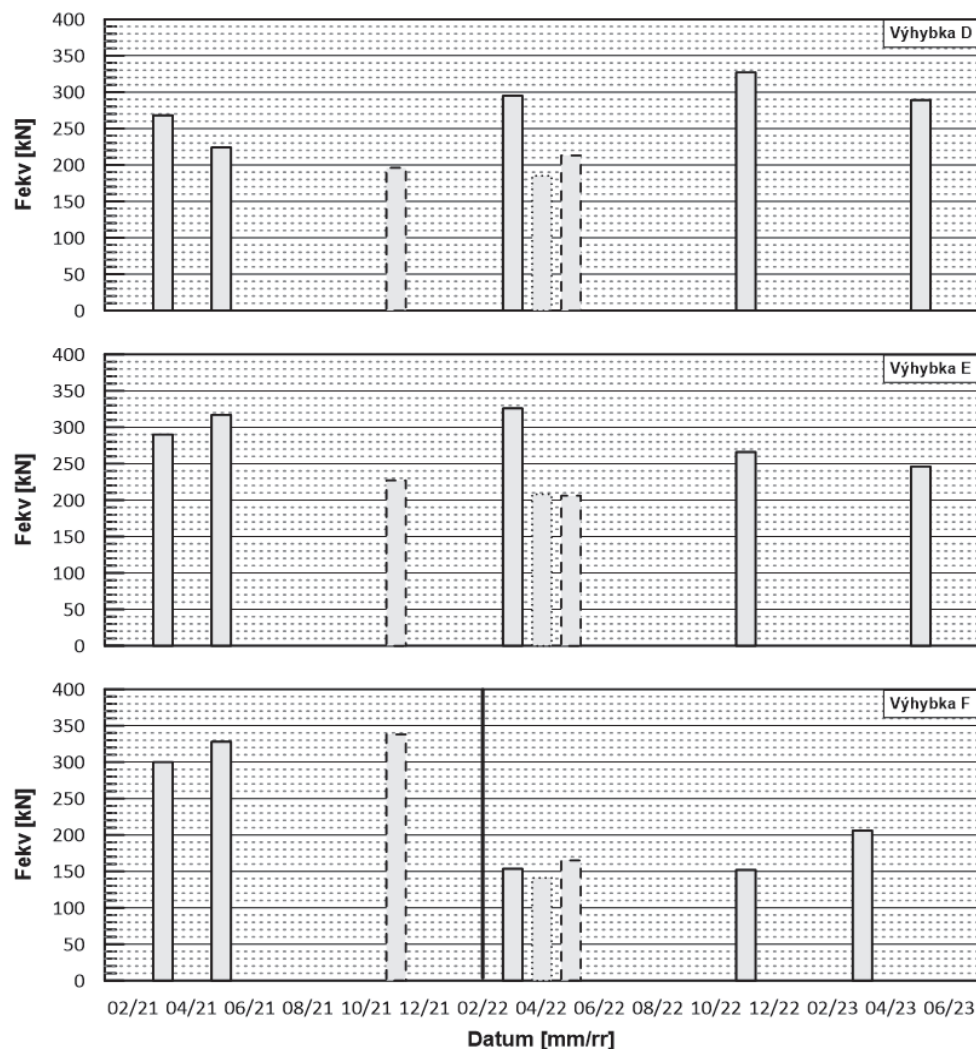
Lze rovněž konstatovat, že pr ubeh ekvivalentního zat izen ı se nemění ani podle toho, která náprava p
es srdcovku proj ızd ı. Tuto skutečnost dokazuje graf na **obr. 4**, kde jsou p
es sebe vykresleny pr ubehy ekvivalentního zat izen ı zjiřt en ho pr ı p
ejezdu prví a druhé nápravy p
es srdcovku pr ı témže pr ıjezdu vozidla výhybkou E.



**Obr. 4** Pr ubehy ekvivalentního zat izen ı pr ı pr ıjezdu výhybkou E dne 20. 3. 2023 (plná  ara – kolo 12; tečkovaná  ara – kolo 22)

**Fig. 4** Courses of the equivalent loading during passing over the turnout E on the 20<sup>th</sup> March 2023 (continuous line – wheel 12; dotted line – wheel 22)

Výsledné vyhodnocení stavu výhybky z pohledu proj ızd j ıc ho vozidla je uvedeno na **obr. 5**, kde jsou formou sloupcových grafů zobrazeny maximální hodnoty ekvivalentního zat izen ı pr ı p
ejezdu kola ze srdcovky na křídlovou kolejnici í naopak u výhybek D, E a F zjiřt en e v období 2021+2023. Tyto grafy zřeteln e zn azoruuj ı vývoj maximální hodnoty ekvivalentního zat izen ı pr ı pr ıjezdu p
es srdcovku ve sledovan m  asov m období. Pro p
ehlednost jsou zde v razn e niřší rychlosti (než je traťov  rychlost) odliřeny jin ımi charaktery obrysov e čary sloupců.  etnost ziskann ch dat je v současnosti stále dána četností pr ıjezdu měřicího vozu p
es výhybky. Měřicí v z totiř provádí v tomto traťov m úseku pravidelná měření parametrů pevných trakcn ch zařízení pouze dvakrát za rok (kampaňov t e měření). V p
ıpad e měřicího zařízení um ıřt en ho na vozidlech v pravideln m provozu bude mořn e stanovit maximální hodnotu ekvivalentního zat izen ı prakticky v mnohem hustř ım intervalu, coř umořn ı popsat vývoj této veličiny podrobněji (s výhledem predikovan ı vývoje) a rovněž bude mořn e i p
esn ji stanovit jednotliv e vlivy, které maximální hodnotu ekvivalentního zat izen ı nebo i jeho pr ubeh ovlivn uj ı. Jedná se p
edevř ım o počasí, technick ı stav vozidla a  drřbov e zásahy na výhybce.



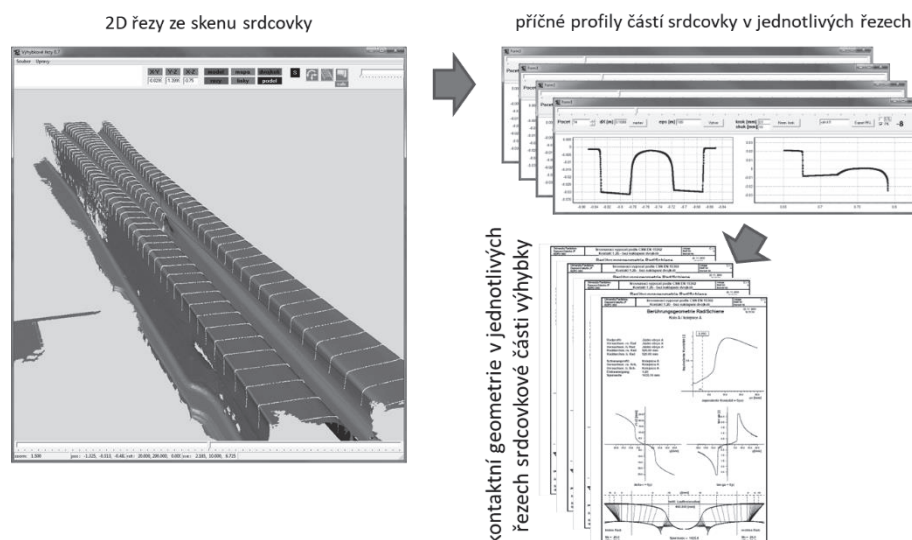
**Obr. 5** Maximální hodnoty ekvivalentního zatížení při přejezdu kola přes srdcovku u výhybek D, E a F stanovených z vybraných měření v období 2021÷2023 (obrysově čáry sloupců: plná – 154÷160 km/h; čárkovaná – 140÷141 km/h; tečkovaná – 108÷114 km/h)

**Fig. 5** Maximum values of the equivalent loading during passing of a wheel over a crossing area of the turnouts D, E and F determined from the selected measurements (contour lines of the columns: continuous – 154÷160 kmph; dashed – 140÷141 kmph; dotted – 108÷114 kmph)

#### 2.4 Svislá trajektorie pohybu kola

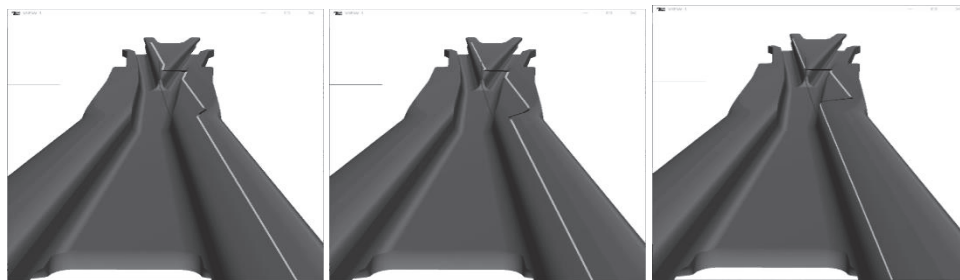
Opotřebenění srdcovky a podepření pražců má při průjezdu kola srdcovkou vliv na výsledný svislý pohyb kola a související silové působení mezi vozidlem a kolejí. Z toho důvodu byla kromě celkového hodnocení stavu výhybek z měřených hodnot svislých zrychlení provedena analýza kontaktu kolo/srdcovka ve svislém směru a svislý pohyb kola byl zařazen jako jeden ze vstupů do expertního hodnocení stavu srdcovky.

Zjistit a kvantifikovat opotřebení srdcovky je možné kontaktním měřením v definovaných řezech (2D) nebo dokonalejším bezkontaktním skenováním celé srdcovky (3D), ze kterého je možné 2D řezy transformovat a vypočítat charakteristiky kontaktní geometrie dvojkolí–kolej (**obr. 6**).



**Obr. 6** Příklad transformace skenované srdcovky na řezy a jejich použití při výpočtu charakteristik kontaktní geometrie dvojkolí–kolej

**Fig. 6** Example of the scanned frog transformation into the cross-sections and their using for calculation of wheelset-track contact geometry parameters



**Obr. 7** Příklad polohy kontaktních bodů při přechodu kola z křídlové kolejnice na srdcovku, která vyplývá z výpočtu charakteristik kontaktní geometrie dvojkolí–kolej pro různou příčnou polohu dvojkolí ve volném kanálu koleje

**Fig. 7** Example of contact points position during passing of a wheel from a wing rail to a frog, which resulting from calculation of wheelset-track contact geometry parameters for a different lateral position of a wheelset in gauge play

V kombinaci s teoretickým dvojkolím je tak možné pro dané příčné posunutí dvojkolí v koleji určit teoretický svislý pohyb kontaktního bodu na příslušných částech srdcovky. Poloha kontaktních bodů souvisí se svislým pohybem kola při průjezdu přes srdcovku, ze kterého je možné určit podélný pohyb a kontaktní úhel srdcovky [3], který ovlivňuje velikost svislého silového působení mezi kolem a kolejnicí.

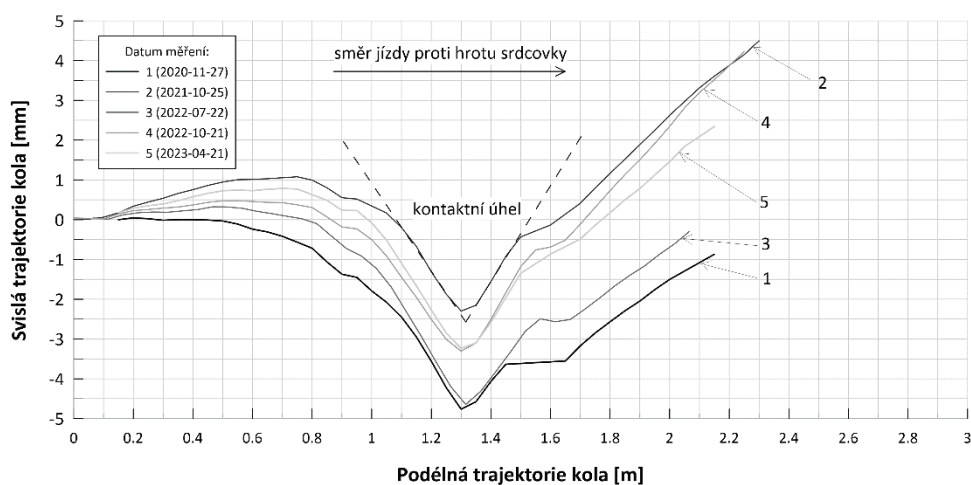
$$P_1 = P_0 + 2 \cdot \alpha \cdot v \cdot \sqrt{\frac{k_H \cdot m_{T1}}{1 + \frac{m_{T1}}{m_U}}} \quad (1)$$

$$P_2 = P_0 + 2 \cdot \alpha \cdot v \cdot \sqrt{\frac{m_U}{m_U + m_{T2}}} \cdot \left[ 1 - \frac{c_T \cdot \pi}{\sqrt{k_{T2} \cdot (m_U + m_{T2})}} \right] \cdot \sqrt{k_{T2} \cdot m_U} \quad (2)$$

Kde:

- $P_0$  statická síla v kontaktu kolo/kolejnice
- $2\alpha$  kontaktní úhel srdcovky
- $v$  rychlost vozidla
- $k_H$  Hertzova kontaktní tuhost
- $m_{T1}$  efektivní hodnota hmotnosti koleje pro výpočet  $P_1$
- $m_U$  neodpružená hmotnost
- $m_{T2}$  efektivní hodnota hmotnosti koleje pro výpočet  $P_2$
- $k_{T2}$  ekvivalentní tuhost koleje pro výpočet  $P_2$
- $c_T$  ekvivalentní tlumení koleje pro výpočet  $P_2$

Příklad změny svislé trajektorie kola při průjezdu srdcovkou je uveden na **obr. 8**. Podrobnější analýza vývoje a interpretace dat bude následovat po doplnění některých podkladů od externích dodavatelů.

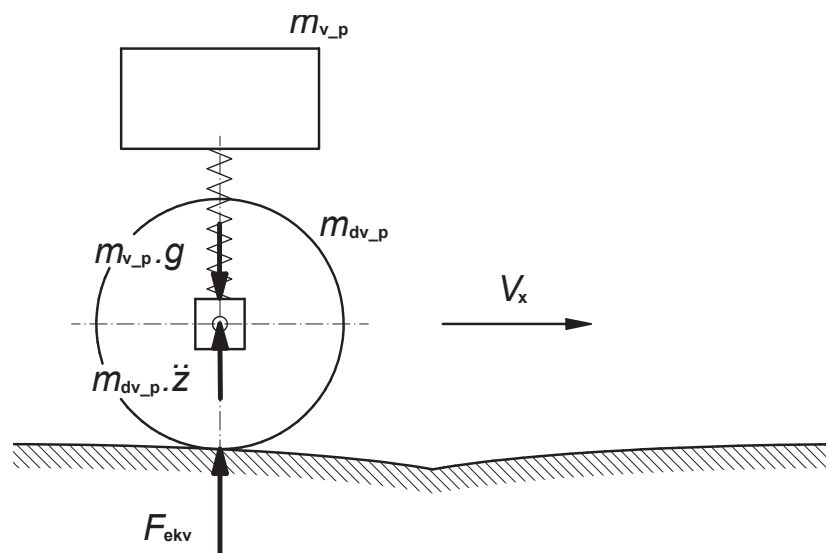


**Obr. 8** Příklad změny svislé trajektorie kola při průjezdu vybranou srdcovkou

**Fig. 8** Example of the vertical trajectory variation during passing over the selected frog

Výše uvedený princip hodnocení je založen na vyšetření kinematické vazby dvojkolí-kolej, která zohlední pouze geometrii kola a kolejnice, resp. dvojkolí a koleje. Skutečný stav výhybky v srdcovkové části, predikce celkového vývoje a nutnost případného zásahu je ovšem ovlivněna také stavem uzlu upevnění, ztuhnutím štěrkového lože, případně i dalších konstrukčních vrstev kolejového spodku.

Druhá možnost, popisující trajektorii kola, vychází z hodnocení měření zrychlení na ložiskové skříně dvojkolí (**obr. 9**), které lze za jistých podmínek transformovat na svislý pohyb ložiskové skříně.



Obr. 9 Průjezd dvojkolí srdcovkou

Fig. 9 Passing of a wheelset over a frog

Svislý pohyb tak charakterizuje absolutní posun nejen kola, ale také všech dynamicky ovlivněných  ast i výhybky a podloží. Tento přístup sice neumožňuje oddělit jednotliv e  asti dynamické soustavy (srdcovka, uzel upevnění, podloží) a je zavisl y na stavu dvojkolí, umožňuje však komplexní kvantifikaci problematickeho místa ve výhybce.

## 5 ZÁVĚR

Internet věcí, strojov e učení a cenov e dostupná m er ic i technika s dostaa ujic i přesností jsou nástroje, které mohou být efektivně využity také v provozu na moderní železnici. A p rav e autonomní diagnostický s ystem pro m er en i a hodnocení stavu výhybek by měl v budoucnu nahradit ve větši m ire j i  dnes chyb ejic i kvalifikovan e zam estn ance, a kromě snižení nákladů při predikované a optimalizované u dr b e výhybek by se měl stát dal sim prvkem zajištění bezpečnosti provozu drážní dopravy.

*P r isp evok vznikl v rámci řešení projektu Výhybka 4.0 (CK01000091) programu Doprava 2020+ Technologické agentury  esk e republiky (TA  R). Poděkování za v st r icn y přístup při realizaci m er en i patří pracovníkům Centra techniky a diagnostiky, střediska diagnostiky pevných trakčních za izen i v Bohumíně.*

## Literatura

[1] ZELENKA, J., HÁBA, A., KOHOUT, M.: Stanovení ekvivalentního zatížení srdcovkové  asti železniční výhybky příjezdu vozidla p r střednictv im postupů uvedených v EN 14363. Certifikovaná metodika 95/2014-710-VV/1 ze dne 11. listopadu 2014. [2] KOHOUT, M., VÁGNER, J., HÁBA, A.: Diagnostika výhybek s využitím koľajových vozidel. P r isp evok na konferenci Súčasné problémy v koľajových vozidlech. Strana 115 120. Pardubice, 2021, ISBN 978-80-7560-377-7. [3] JENKINS, H. H., STEPHENSON, J. E., Clayton, G. A., MORLAND, G. W.: The Effect of Track and Vehicle Parameters on Wheel/Rail Vertical Dynamic Forces. Railway Engineering Journal, January 1974.



### Resumé

Železniční výhybky jsou z pohledu celkových nákladů na údržbu ve srovnání s běžnou kolejí problematickým prvkem infrastruktury. Silové zatěžování neodpružených částí vozidel a poškození srdcovky je dáno dynamickou interakcí jedoucího vozidla a srdcovky. Článek se proto zabývá analýzou výsledků měření zrychlení na vozidle, které dává komplexní obraz o dynamickém stavu výhybky a podloží, v souvislosti s dostupnými informacemi z měření parametrů vybraných výhybek.

### Summary

Railway switches are a problematic element of infrastructure in terms of overall maintenance costs compared to ordinary track. Force loading of unsprung parts of vehicles and damage to the frog is determined by the dynamic interaction of the moving vehicle and the frog. The article therefore deals with the analysis of the results of acceleration measurements on the vehicle, which gives a comprehensive overview of the dynamic state of the turnout and the superstructure, in connection with the available information from the measurement of the parameters of the selected turnouts.

