

BEZKONTAKTNÍ SYSTÉM PRO MĚŘENÍ ÚHLU NÁBĚHU DVOJKOLÍ

CONTACTLESS SYSTEM FOR WHEELSETS' ANGLE OF ATTACK MEASUREMENT

Jan KALIVODA¹, Petr BAUER², Martin NOVÁK³, Zdeněk NOVÁK⁴

e-ISBN: 978-80-7560-564-1
DOI: 10.46585/spkv20252660

ISSN: 3029-8342



Abstrakt

Příspěvek se zabývá návrhem senzorického systému, který je schopen spojitě měřit úhel náběhu dvojkolí. Cílem je vyvinout bezkontaktní způsob měření úhlu náběhu dvojkolí pomocí senzorů umístěných na vozidle, který je aplikovatelný při testech dle EN14363 a potencionálně i v reálném provozu jako součást systémů aktivního radiálního stavění dvojkolí. Příspěvek se zaměřuje na nalezení vhodného typu senzorů a jejich umístění a výsledky testování v laboratorních podmínkách.

Klíčová slova

dvojkolí, úhel náběhu, měření, senzory

Abstract

The paper deals with the design of a sensor system for the detection of angle of attack of wheelsets relative to the track. The goal is to develop a contactless, vehicle-mounted method of measuring the angle of attack of wheelsets applicable in tests according to EN14363 and potentially also on vehicles in real operation as part of active radial wheel steering systems. The paper focuses on selection the appropriate type of sensors and their placement, as well as the results of testing in laboratory conditions.

Keywords

wheelset, angle of attack, measurement, sensors

1 ÚVOD

Geometrie dvojkolí a koleje vždy zajišťuje existenci příčné vůle, která umožňuje dvojkolí jednak volné odvalování v podélném směru koleje, ale také příčné vychylování a natáčení kolem svislé osy. Důsledkem toho je, že každé železniční kolo během jízdy průběžně mění svou příčnou pozici vůči kolejnici (příčná výchylka y) a zároveň mění také úhel, pod kterým nabíhá na kolejnici (úhel náběhu α), viz obr. 1. Úhel náběhu je důležitý parametr jízdy vozidla v koleji. Se znalostí jeho průběhu lze lépe hodnotit jízdní vlastnosti vozidla jako je jízdní bezpečnost nebo účinky vozidla na trať. Z toho důvodu je sledování úhlu

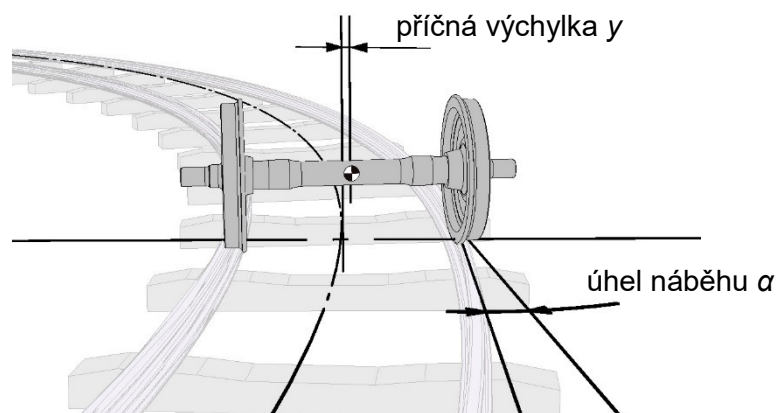
¹ Ing. Jan Kalivoda, Ph.D.,  0000-0002-0278-2515. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel. Technická 4, 160 00 Praha 6, Česká republika, tel.: +420 224 352 493, e-mail: jan.kalivoda@fs.cvut.cz

² Ing. Petr Bauer, Ph.D.,  0000-0002-0940-3303. Dtto, e-mail: petr.bauer@fs.cvut.cz

³ doc. Ing. et Ing. Martin Novák, Ph.D.,  0000-0002-2046-8765. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav přístrojové a řídicí techniky. Technická 4, 160 00 Praha 6, Česká republika, tel.: +420 224 352 573, e-mail: martin.novak@fs.cvut.cz

⁴ Ing. Zdeněk Novák, Ph.D.,  0000-0003-4714-7344. Dtto, tel.: +420 224 352 567, e-mail: z.novak@fs.cvut.cz

náběhu vyžadováno v rámci homologačních zkoušek nových nebo rekonstruovaných vozidel dle ČSN EN 14363. Velikost úhlu náběhu je často sledována i v rámci výzkumu a vývoje, neboť ovlivňuje řadu dalších důležitých parametrů jako je opotřebení kol a kolejnic nebo jízdní odpory vozidla v oblouku koleje.

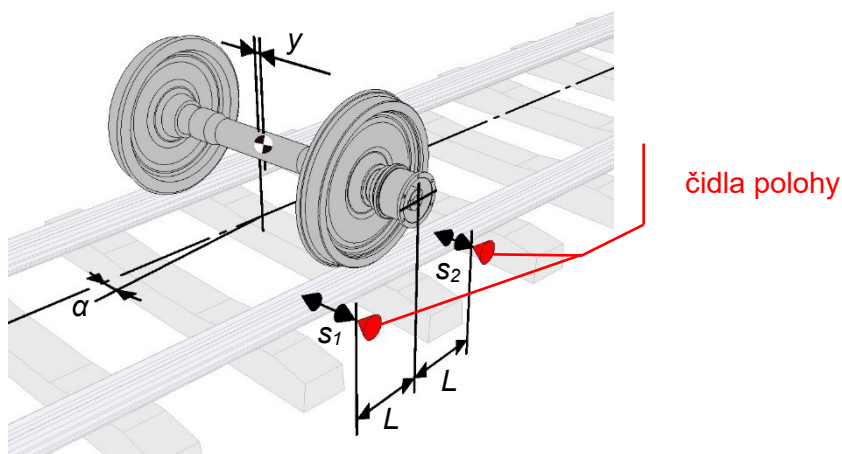


Obr. 1 Poloha dvojkolí vzhledem k trati

2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

V současné praxi jsou k měření úhlu náběhu využívány jak kontaktní, tak bezkontaktní měřicí systémy. Ve všech nám známých případech systém měří změnu příčné relativní vzdálenosti s_1 před a s_2 za daným železničním kolem, viz obr. 2. Z těchto dvou hodnot a jejich známé podélné báze jsou pak stanoveny úhel náběhu jako

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{s_1 - s_2}{2L} \right) \approx \frac{s_1 - s_2}{2L} \quad (1)$$



Obr. 2 Princip měření úhlu náběhu

2.1 Kontaktní způsob měření

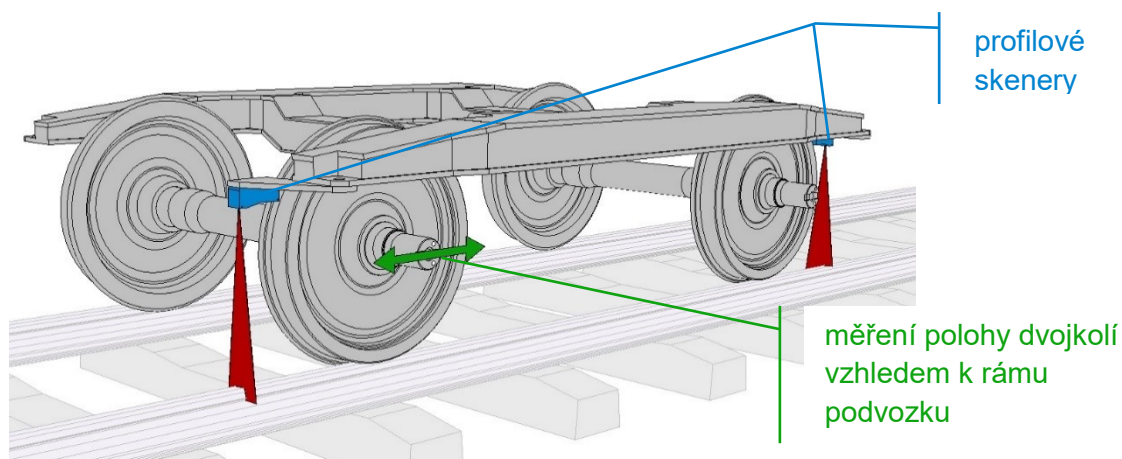
Tato metoda většinou využívá kladky malého průměru odvalující se po boku kolejnice. Mechanismus jejich zavěšení měří jejich příčnou výchylku vůči ložiskové skříni dvojkolí. Výhodou tohoto řešení je bezproblémové pokrytí požadovaných měřicích rozsahů, nízké pořizovací náklady a jednoduché zpracování signálu. Nevýhodou je omezení měření jen na traťové úseky s volnými boky kolejnic (problémem tak jsou výhybky, přejezdy, přídržnice, kolejnicové styky nebo žlábková koleje). Dále je zde výrazné omezení rychlosti jízdy z důvodů dynamického chování mechanických částí měřidla.

2.2 Bezkontaktní způsob měření

Hlavní výhody bezkontaktního způsobu měření jsou zřejmé – teoreticky klesá omezení rychlosti jízdy i riziko kolize s infrastrukturou. Pro bezkontaktní způsob měření jsou nejčastěji použity optické snímače. Obecně jsou optická čidla méně odolná vůči dynamickému zatížení, spolehlivost měření významně ovlivňuje čistota prostředí, světelné poměry, a také stav povrchu kolejnice v měřeném místě. Výhodou je dostupnost snímačů s dostatečným rozsahem, nevýhodou zase větší zástavbové rozměry. Principiálně lze použít snímače jednobodové, nebo vícebodové (profilové skenery).

Princip měření jednobodovými bezkontaktními snímači je shodný s měřením pomocí kontaktních snímačů. Jednobodové snímače lze instalovat do výšky boku hlavy kolejnice, tak aby byl laserový paprsek snímače rovnoběžný s rovinou temene kolejnic. Pak se se změnou úhlu náběhu nebo příčné polohy kola (příliš) nemění místo odrazu paprsku na boku hlavy kolejnice, čímž se vyhodnocení měření značně zjednodušuje. V takové konfiguraci ale může být měření realizováno jen na omezeném měřicím úseku koleje bez pevných překážek kolem kolejnic. Instalace těchto čidel do bezpečné výšky nad kolej pak díky obecnému tvaru reálných kolejnic naopak vyhodnocení velmi komplikuje.

Měření úhlu náběhu s využitím profilových skenerů je vlastně nepřímým měřením. Nízká odolnost profilových skenerů proti dynamickému zatížení neumožňuje jejich instalaci na neodpruženou hmotu vozidla. Čidla jsou proto umístěna na rámu podvozku a slouží k měření polohy rámu podvozku vůči kolejnici, viz obr. 3. Současně musí být měřena relativní poloha dvojkolí vůči rámu podvozku. Poloha dvojkolí vůči koleji je následně z měřených hodnot dopočtena. Všechna tato opatření mají nepříznivý vliv na přesnost měření. Další podstatnou nevýhodou použití profilových kamer jsou vysoké nároky na zástavbový prostor.



Obr. 3 Princip měření úhlu náběhu pomocí profilových skenerů

Z uvedeného přehledu vyplývá, že většina v současnosti používaných kontaktních a bezkontaktních systémů pro měření úhlu náběhu je omezena na úseky trati s volným prostorem podél boků hlav kolejnic. Použití profilových skenerů tento problém řeší, ale jejich použitelnost je značně omezena citlivostí těchto zařízení na vibrace a další vlivy prostředí. Výše zmiňované nedostatky používaných systémů významně komplikují jejich použití při provádění zkoušek ve zkušebním oblouku R 150 m dle ČSN EN 14363 a neumožňují jejich použití při traťových zkouškách, případně nasazení v běžném provozu.

Inovativní bezkontaktní metodu měření příčné polohy kola vzhledem ke kolejnici využívající dvojici cívek trojúhelníkového tvaru navrhli Enoki a kol. [1]. Na základě výsledků počítačových simulací předpokládají dosažení přesnosti měření 0,7 mm, avšak v případě nesymetrického opotřebení hlavy kolejnice chyba roste až na 12 mm [2]. Jost a Gratzfeld navrhli systém pro měření příčné polohy kola pomocí magnetického pole vytvořeného budicí cívkou umístěnou v horizontální rovině nad hlavou kolejnice [3]. Uvnitř cívky je pole Hallových elementů orientovaných rovnoběžně s osou dvojkolí. Navrhovaný měřicí systém se skládá z dvojice cívek s Hallovými prvky, jedna je instalována před a druhá za kolem ve směru jízdy vozidla. Prototyp senzoru byl testován na zkušebním zařízení s maximální chybou 2 mm. Další bezkontaktní metody známé z literatury předpokládají konstantní výšku nad temenem

kolejnice. Avšak tento požadavek je v praxi obtížné splnit vzhledem ke změnám valivého poloměru kola a natáčení ložiskové komory kolem osy dvojkolí.

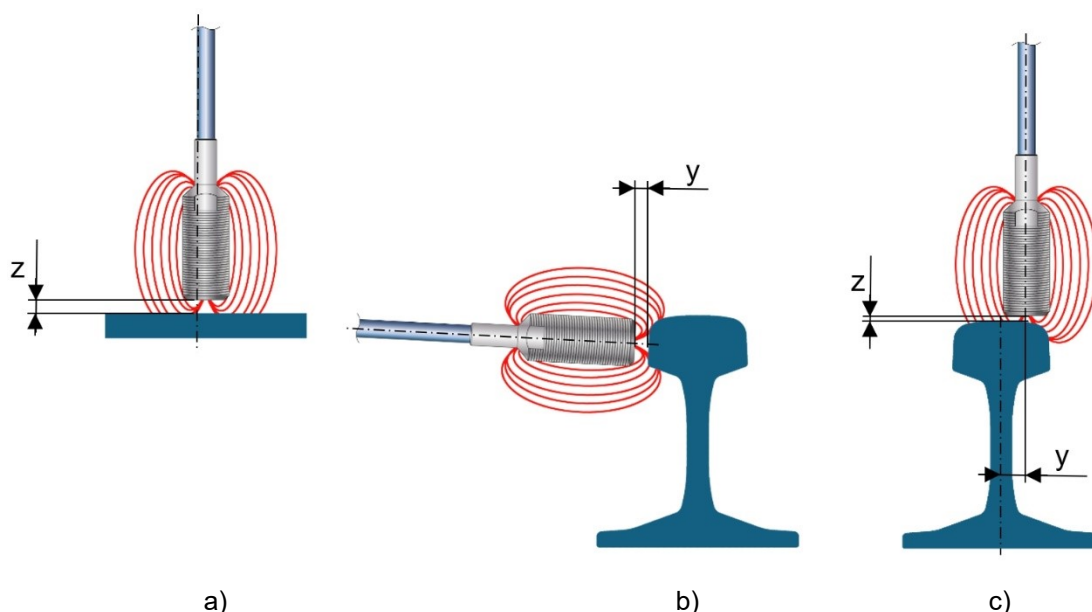
3 POŽADAVKY NA MĚŘICÍ SYSTÉM

Je proto žádoucí vyvinout nový systém pro měření úhlu náběhu dvojkolí, který by eliminoval výše uvedené nevýhody a byl použitelný nejen pro zkoušky vozidel v rámci homologačního procesu, ale potenciálně i aplikovatelný v běžném provozu vozidla jako součást aktivního systému natáčení dvojkolí. Základní vlastnosti nového senzorového systému by měly být:

- měření úhlu náběhu dvojkolí v rozsahu $\pm 2^\circ$,
- vysoká odolnost vůči vibracím a dalším nepříznivým vlivům prostředí umožňující přímé uchycení k nápravové skříni,
- umístění senzorů a dalších komponent měřicího systému umožňující průjezd vozidla výhybkami a přejezdy,
- nízká citlivost na změny výšky nad temenem kolejnice, které vznikají v důsledku pohybů dvojkolí a nápravové skříně.

4 VOLBA SENSORŮ

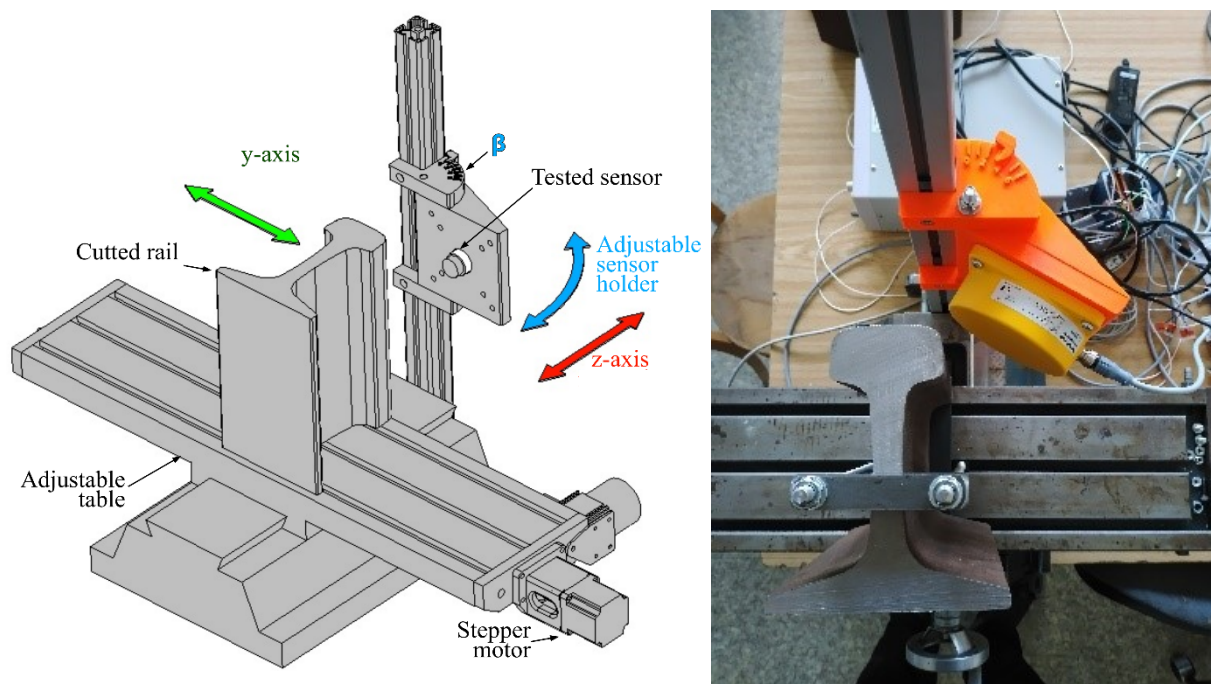
S ohledem na požadované vlastnosti měřicího systému, zejména pak mechanickou odolnost a odolnost vůči vlivům prostředí bylo od počátku uvažováno s indukčními čidly, která reagují na změny magnetického pole vlivem přítomnosti feromagnetického objektu. Tato čidla slouží jak k prosté detekci přítomnosti kovového objektu, tak i k měření vzdálenosti od něj. Standardní aplikace je zobrazena na obr. 4 a). Měřený objekt má mít rovnou plochu kolmou na osu čidla o rozměru odpovídajícím minimálně dvojnásobku průměru čidla. Pro aplikaci těchto čidel k měření příčné vzdálenosti od hlavy kolejnice y lze tento požadavek splnit umístěním čidla vhodné velikosti dle obr. 4 b), avšak za cenu kolize s infrastrukturou v místech, kde není volný prostor podél boků hlav kolejnic. Proto bylo zvoleno uspořádání dle obr. 4 c). Podstatou komplikací tohoto uspořádání je, že čidlo musí vykazovat citlivost na polohu kovového předmětu v příčném směru y , tedy ve směru, pro který není primárně navrhováno, a zároveň mít minimální citlivost změnu vzdálenosti v ose čidla z .



Obr. 4 Měření vzdálenosti pomocí indukčního čidla a) standardní aplikace, b) umístění z boku hlavy kolejnice, c) umístění shora hlavy kolejnice

Pro účely stanovení vlastností vybraných senzorů byl vytvořen testovací stand, obr. 5. Toto zařízení umožňuje měření odezvy testovaného senzoru v závislosti na relativní poloze senzoru a reálného vzorku

kolejnice. Polohu senzoru lze plynule měnit v příčné ose simulované koleje (osa y), v ose kolmé k rovině temene kolejnice (osa z) a otáčet kolem osy rovnoběžné s podélnou osou kolejnice (úhel β). Pohyb v osách y a z je zajišťován pomocí krokových motorů.



Obr. 5 Zkušební stolice pro testování odezvy senzorů

Skutečná relativní poloha senzoru a kolejnice je kontinuálně měřena pomocí potenciometrických senzorů polohy. Konstrukce zařízení umožňuje měnit tuto relativní polohu v dostatečně velkých rozsazích, aby simulovala maximální očekávané pohyby v reálném měření s dvojkolím v koleji. Měření lze provádět s různými vzorky kolejnic. Držák senzoru umožňuje upevnění senzorů různých typů nebo více senzorů současně. Z řady dostupných průmyslově vyráběných indukčních čidel byly vytipovány 3 typy, které byly testovány. Výsledky testování jsou podrobně uvedeny v [4]. Testy prokázaly dostatečnou citlivost čidel na příčnou vzdálenost od kolejnice y , avšak současně vysokou citlivost na svislou vzdálenost čidla od kolejnice z . Během jízdy vozidla nelze spolehlivě zaručit konstantní výšku čidla nad kolejnicí, která kolísá vlivem změn aktuálního valivého poloměru kola a naklápění ložiskové komory kolem příčné osy. Z výstupu čidla umístěného podle obr. 4 c) proto nelze jeho příčnou vzdálenost od kolejnice spolehlivě určit.

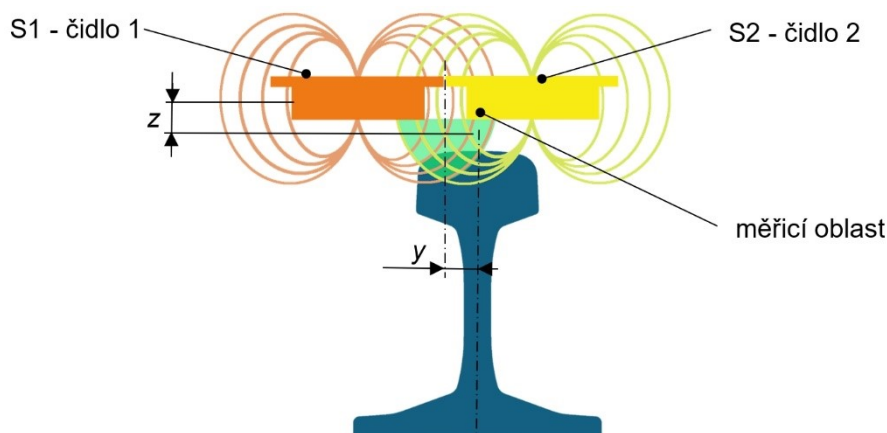
5 USPOŘÁDÁNÍ SENSORŮ A KALIBRACE SYSTÉMU

Z výše uvedených důvodů bylo navrženo uspořádání čidel, které je schematicky znázorněno na obr. 6. Jedná se o paralelní umístění dvojice čidel v těsné blízkosti vedle sebe. Měřicí oblast se pak nachází v místech, kde jsou k dispozici výstupy z obou čidel současně. Z těchto výstupů je následně vypočtena neznámá poloha vzhledem ke kolejnici daná souřadnicemi y a z .

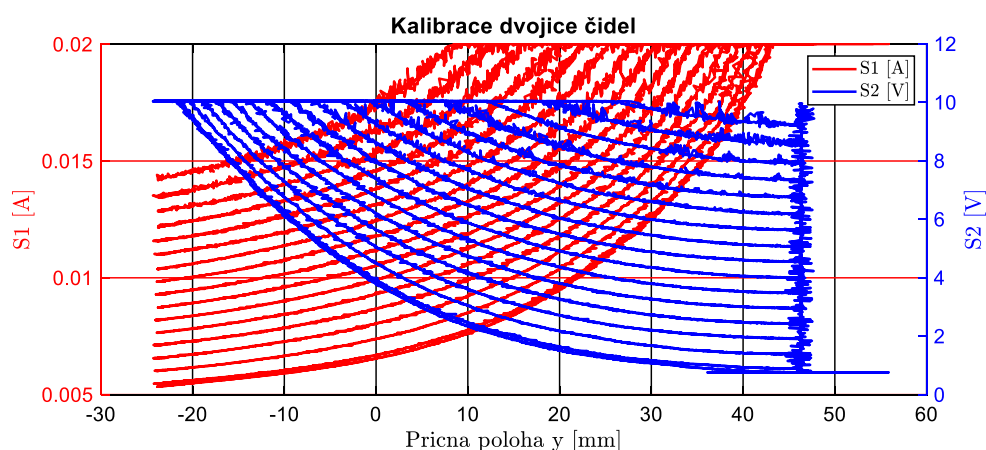
Umístění dvojice čidel v těsné blízkosti vedle sebe není v souladu s doporučeními výrobců, protože v takovém případě dochází k jejich vzájemnému ovlivňování a zkreslení výstupního signálu. Z toho důvodu byla použita dvojice čidel od různých výrobců pracujících na odlišných frekvencích a s různou formou výstupního signálu (čidlo 1 proudový, čidlo 2 napěťový). Vzájemné ovlivnění zvolené dvojice čidel v těsné blízkosti vedle bylo testováno na zkušebním zařízení. Výstupní signál z obou čidel spojitě reagoval na změny polohy kolejnice v rámci měřicí oblasti, a to jak ve svislém, tak i v příčném směru.

Kalibrace měřicího systému byla provedena pomocí automatizované sekvence, při které byla postupně měněna příčná vzdálenost od kolejnice y v různých výškách nad kolejnicí z . Poloha čidel vzhledem ke kolejnici byla přímo měřena pomocí potenciometrických čidel a zároveň byla sledována odezva čidel S1 a S2. Výstup z kalibračního měření je zobrazen na obr 7.

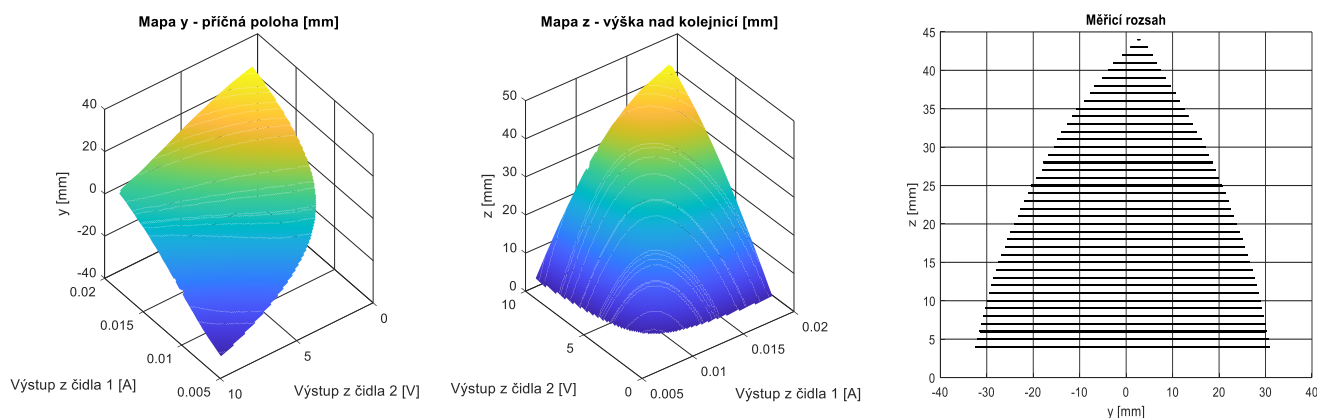
Výstupy z kalibračního měření byly následně filtrovány a zpracovány do podoby dvou map čidel – Mapa y a Mapa z, viz obr. 8a. Jedná se v podstatě o dvě tabelárně definované funkce dvou proměnných – výstupů z čidel S1 a S2 jejichž výsledkem je poloha vzhledem ke kolejnici ve příčném y a svislém směru z. Na obr. 8b je potom graficky znázorněn měřicí rozsah.



Obr. 6 Uspořádání sensorů měření svislé a příčné polohy



Obr. 7 Výstup z kalibračního měření

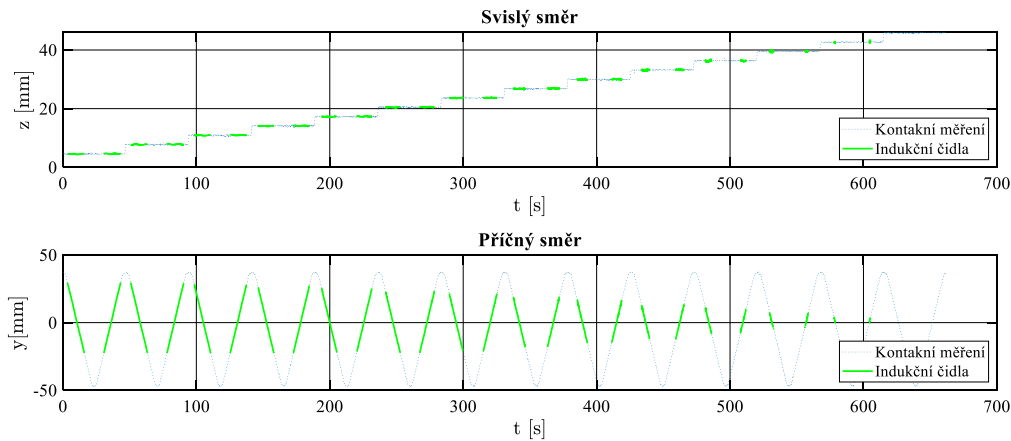


Obr. 8 Mapy dvojice čidel v ose y a z (vlevo), měřicí rozsah (vpravo)

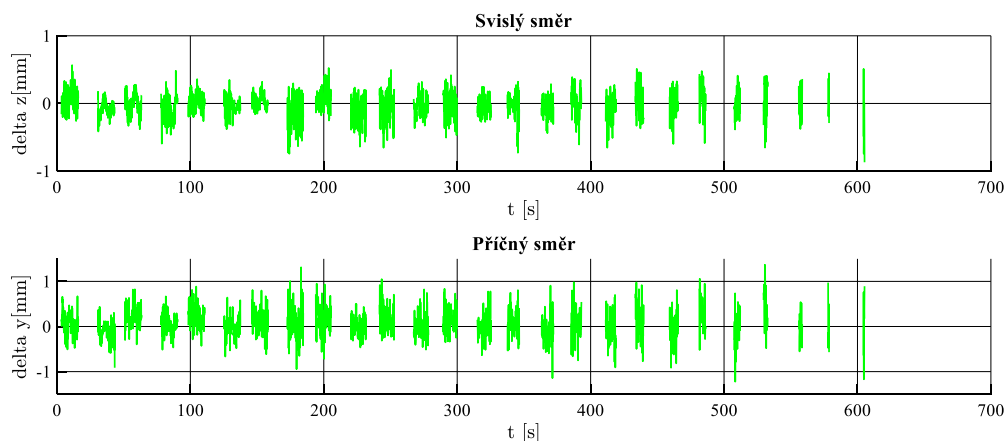
Rozsah měřených příčných výchylek je přibližně 45 mm v rozmezí výšek 5 až 25 mm nad rovinou temene kolejnice. S dále rostoucí výškou pak tento rozsah klesá od výšky 45 mm již příčnou ani svislou vzdálenost od kolejnice detekovat nelze.

6 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Kalibrační mapy byly v podobě lookup tabulek implementovány do software pro zpracování měřených dat na testovacím stavu. Ten tak umožňuje online zobrazovat a porovnávat polohu vzhledem ke kolejnici přímo měřenou pomocí kontaktních čidel a bezkontaktně měřenou pomocí navrženého senzorického systému. Porovnání přímo a nepřímo měřených hodnot je zobrazeno na obr. 9.



Obr. 9 Průběh svislé a příčné polohy při testovacím měření



Obr. 10 Odchylka přímo a bezkontaktně měřených hodnot

Testování na zkušebním stavu potvrdilo možnost bezkontaktního měření polohy vzhledem ke kolejnici pomocí dvojice indukčních čidel. V rámci měřicího rozsahu je střední hodnota odchylky přímo a bezkontaktně měřené vzdálenosti ve svislém směru, $-0,020$ mm se směrodatnou odchylkou $0,18$ mm. V příčném směru je střední hodnota odchylky přímo a bezkontaktně měřené vzdálenosti $0,073$ mm se směrodatnou odchylkou $0,29$ mm. Za předpokladu normálního rozdělení je tak s pravděpodobností 99% chyba měření příčné polohy menší než $0,75$ mm a svislé polohy menší než $0,5$ mm.

7 ZÁVĚR

Úhel, pod kterým nabíhá železniční kolo na kolejnici, je důležitým parametrem, který ovlivňuje řadu sledovaných bezpečnostních a provozních kritérií. Měření úhlu náběhu je zpravidla založeno na měření příčné vzdálenosti dvou bodů pevně spojených s ložiskovou komorou od hlavy kolejnice. K tomu se používají jak kontaktní, tak i bezkontaktní čidla, avšak všechny dosud používané systémy vykazují výrazná omezení z hlediska rychlosti, kompatibility s infrastrukturou či odolnosti vůči vibracím a nečistotám. Proto byl navržen nový bezkontaktní systém měření úhlu náběhu založený na využití indukčních čidel.

Laboratorní testování navrhovaného řešení prokázalo:

- Použitím dvou paralelně umístěných indukčních čidel lze současně měřit příčnou a svislou vzdálenost od kolejnice.
- Umístění čidel zajišťuje bezkontaktní způsob měření s možností průjezdu výhybek, křížení, nebo železničních přejezdů.
- Rozsah měřených příčných výchylek závisí na svislé vzdálenosti od hlavy kolejnice. V rozmezí výšek 5–25 mm nad TK, je rozsah měřených příčných vzdáleností od hlavy kolejnice přibližně 45 mm, což při umístění čidel ve vzdálenosti 450 mm před a 450 mm za osou dvojkolí odpovídá rozsahu měřeného úhlu náběhu 0 - 2,86°.
- Dosahovaná přesnost měření v příčném směru je $\pm 0,75$ mm, to odpovídá přesnosti měření úhlu náběhu $\pm 0,05^\circ$.
- Dosažený rozsah měření je postačující pro měření úhlu náběhu na nabíhající kole v rámci zkoušek dle EN 14363. Pro měření úhlu náběhu dvojkolí v obecné příčné poloze v rámci vůlí v kolejovém kanálu je nezbytné rozsah měření zvýšit.

V rámci dalšího vývoje bude navrhovaný systém umístěn na jednoduchý vozík, který je schopen autonomního pohybu nízkou rychlostí v koleji. Pomocí testů na vozíku bude sledován např. vliv změny tvaru hlavy kolejnice, vliv rychlosti jízdy, možnost automatizované kalibrace systému v daném místě koleje apod. Následně bude systém umístěn na vozidle a použit v rámci testů dle EN 14363, při kterých bude úhel náběhu paralelně měřen doposud používaným i nově navrhovaným způsobem následně porovnány výsledky.

The paper was created with the financial support of the Technology Agency of the Czech Republic, project No. TE01020054 "Božek Vehicle Engineering – National Competence Center".



Literatura

- [1] ENOKI, S., ASAHI, T., WATANABE, S., MIZUNO, T., TAKESHITA, K. Electromagnetic measurement of the rail displacement by two triangular coils. *IEEE Transactions on Magnetics*. Vol 38 (2002), issue 5, s. 3303–3305. ISSN 0018-9464.
- [2] SHIMOJIMA, Y., BU, Y., MIZUNO, T., ASAHI, T., ITO, M., ENOKI, S. *Influence of Rail Wear on Output Voltage of Eddy-Current Rail Displacement Sensor*. Online. In: Ninth International Conference on Sensing Technology, conference proceedings. Auckland: IEEE, 2015, s. 396–401. ISSN 2156-8073. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ICSensT.2015.7438429>. [citováno 2025-06-09]
- [3] JOST, F., RATZFELD, P. Mechatronic guidance for tramways using a novel hall sensor concept. In: *11th International Conference on Railway Bogies and Running Gears, conference proceedings*. Budapest: BME, 2019, s. 254–262.
- [4] KALIVODA, J., BAUER, P., NOVÁK M., NOVÁK, Z. Train based system for wheelsets' angle of attack measurement – laboratory verification of sensor characteristics. In: *Transport Means 2024: Proceedings of the 28th International Scientific Conference*. Kaunas: Kaunas University of Technology, 2024, s. 126–131. ISSN 2351-7034.

Zasláno / received: 13. 06. 2025, přijato / accepted: 08. 07. 2025, publikováno / published: 17. 09. 2025.

Příspěvek recenzovali / The paper was reviewed by: Ing. Lukáš Hejzlar (Výzkumný Ústav Železniční, a.s. (VUZ)), Ing. Martin Kohout, Ph.D. (Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera).