

MOŽNOSTI OVLIVNĚNÍ JÍZDNÍCH A VODICÍCH VLASTNOSTÍ KOLEJOVÝCH VOZIDEL PARAMETRY DOPRAVNÍ CESTY

Doc. Ing. Jaromír Zelenka, Csc., Ing. Martin Kohout
Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera

1. Úvod

Vozidlo a kolej tvoří neoddělitelnou dvojici, kterou je nutné posuzovat jako celek. Vlastnosti vazby dvojkolí-kolej proto ovlivňují bezpečnost provozu, komfort jízdy a silové účinky mezi vozidlem a kolejí, což se projeví také v nákladech na provoz a údržbu.

2. Posuzování interakce mezi vozidlem a kolejí

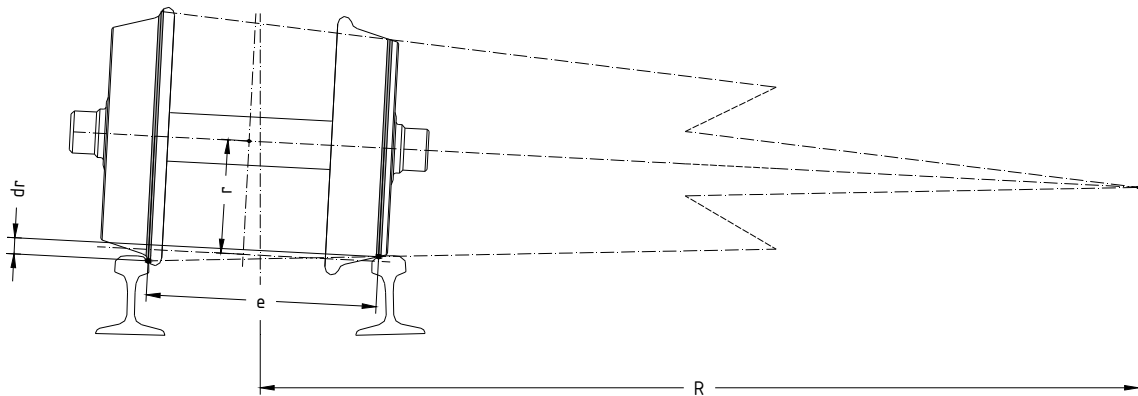
Vzájemná interakce mezi kolejovým vozidlem a kolejí je zjišťována při jízdách zkoušek vozidel [2], [4], které jsou součástí schvalovacího řízení nových, rekonstruovaných nebo modernizovaných vozidel do provozu. Při těchto zkouškách jsou zjišťovány jízdnicí vlastnosti vozidel v přímé koleji (prostřednictvím měření příčných a svislých zrychlení na skříni vozidla a rámu podvozku, sumy vodících sil), a vodící vlastnosti vozidel v obloucích (kvazistatické vodící a kolové síly, bezpečnost proti vykolejení).

S postupným vývojem poznání interakce vozidla a koleje i růstem požadavků na moderní kolejová vozidla (nedostatek převýšení, rychlost jízdy, hmotnost na nápravu) dochází k úpravám norem a vyhlášek ve smyslu přehodnocení stávajících kritérií (mezí hodnota kvazistatické vodící síly v obloucích, bezpečnost proti vykolejení) a nebo doplňování dalších veličin, které je nutné hodnotit či sledovat při provádění jízdnicí zkoušek vozidel (kvazistatická zatěžující síla, ekvivalentní konicita v přímé, index radiálního stavění v obloucích malých poloměrů).

3. Charakteristiky kontaktní geometrie dvojkolí-kolej

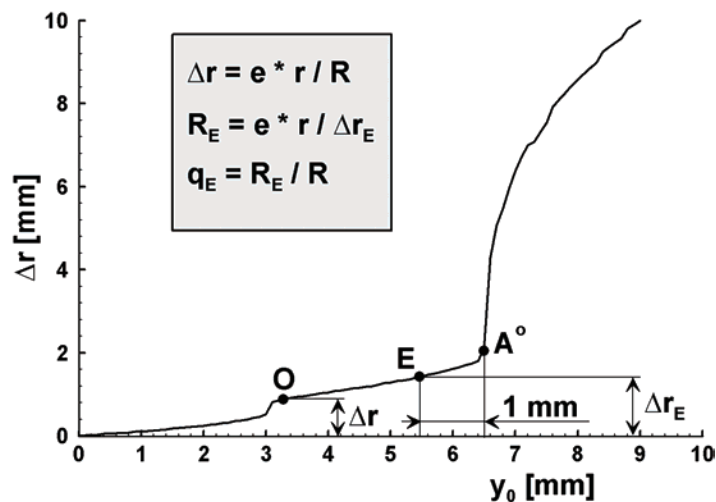
Pokud se v rámci zjednodušení uvažují dvojkolí i kolej jako tuhá tělesa, dále kolej bez směrových a výškových odchylek od jmenovité polohy a zanedbají se skluzu v kontaktu kola s kolejnicí, lze kontaktní poměry mezi dvojkolím a kolejí, tedy kinematickou vazbu volného dvojkolí v přímé koleji, popsat charakteristikami kontaktní geometrie dvojkolí-kolej [1], [3]. Tyto charakteristiky jsou:

- poloha dotykových bodů mezi kolem a kolejnicí;
- funkce Δr , která je definována jako rozdíl poloměrů okamžitých valivých kružnic kol v závislosti na příčném posunutí dvojkolí y_d z centrování polohy ve volném kanálu koleje (viz obr. 1). Tento rozdíl poloměrů okamžitých valivých kružnic způsobuje zakřivení trajektorie pohybu dvojkolí ve volném kanálu koleje a částečně kompenzuje rozdíl ujeté dráhy jednotlivých kol v oblouku;



Obr. 1 Změny poloměrů valivých kružnic jednotlivých kol při příčném posunutí dvojkolí ve vlnném kanálu koleje v oblouku

- funkce $\tan \gamma$ definovaná jako rozdíl hodnot tangente úhlů dotykových rovin kol s kolejnicemi opět v závislosti na příčném posunutí dvojkolí y_d z centované polohy ve vlnném kanálu koleje. Tato funkce vyjadřuje intenzitu příčné silové vazby dvojkolí ke koleji;
- ekvivalentní konicita λ_{ekv} , která charakterizuje periodický vlnivý pohyb volného dvojkolí v přímé koleji. Ekvivalentní konicita je funkcí amplitudy y_0 vlnivého pohybu dvojkolí v koleji (při jejím hodnocení je uvažována smluvní hodnota amplitudy pohybu dvojkolí 3 mm). Tato charakteristika je důležitá při zkoušení vozidel [3], [4] s ohledem na stabilitu pohybu vozidel při vyšších rychlostech. Zvětšující se hodnota ekvivalentní konicity zkracuje délku vlny pohybu volného dvojkolí a tím zvyšuje frekvenci tohoto pohybu, zvyšuje setrvačné účinky dvojkolí při určité rychlosti jízdy a tendenci k neklidnému až k tzv. nestabilnímu chodu. Větší hodnota ekvivalentní konicity však obecně vyjadřuje silnější kinematickou vazbu dvojkolí k ose koleje, tedy dvojkolí je vedeno k důraznějšímu sledování směrových nerovností koleje;
- index radiálního stavění q_E vyjadřuje aktuální možnosti radiálního stavění volného dvojkolí v projížděném oblouku koleje poloměru R pro danou kombinaci jízdního obrysu kola a příčného profilu hlavy kolejnice. Je dán především strmostí funkce Δr .



Obr. 2 Charakteristické body funkce Δr pro výpočet indexu radiálního stavění

4. Dvojkolí v koleji

Vlastnosti pohybu volného dvojkolí v přímé koleji i obloucích jsou určeny především geometrií dvojkolí a koleje v příčném směru a tvary příčných profilů hlav kolejnic a jízdních obrysů kol.

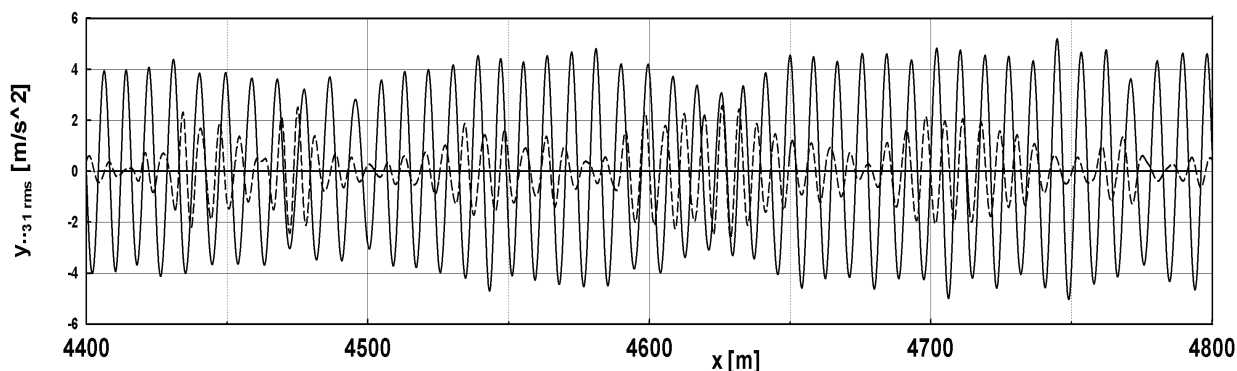
Tvar jízdních obrysů kol prodělal dlouhý vývoj od původního válcového tvaru, přes kuželový až k dnes používanému tvaru křivkovému (ORE S1002). Kuželovitý tvar kol dvojkolí je velmi důležitý, neboť umožňuje samovolné středění dvojkolí v koleji (v rozchodovém kanálu koleje), což je žádoucí z hlediska jízdních vlastností vozidel v přímé koleji (reakce na příčné odchylky polohy kolejnic v provozu od teoretického směru), vodicích vlastností vozidel v oblouku koleje (silové působení mezi kolem a kolejnicí, bezpečnost proti vykolejení) a opotřebením kol i kolejnic.

V teoretické, přímé koleji vykonává při valení volné dvojkolí s křivkovým jízdním obrysem vlnivý pohyb, jehož parametry (amplituda v příčném směru a délka vlny pohybu dvojkolí) jsou závislé na charakteristikách kontaktní geometrie dvojkolí - koleje. Pokud je dvojkolí součástí pojezdu kolejového vozidla, je jeho výsledný pohyb v koleji ovlivňován ještě tuhostí vazby k rámu podvozku (záležitost konstrukce a charakteristik parametrů vedení dvojkolí). Výsledný pohyb vázaného dvojkolí, podvozku i skříně vozidla je tedy ovlivňován konstrukcí a parametry pojezdové části vozidel a výběrem tvaru jízdních obrysů kol a hlav kolejnic. Poněvadž jsou vozidla provozována na různých tratích a při různém stavu opotřebením kol i kolejnic, je nutné věnovat otázkám vazby dvojkolí ke koleji patřičnou pozornost.

5. Jízdní vlastnosti vozidel v přímé koleji při vyšších rychlostech jízdy

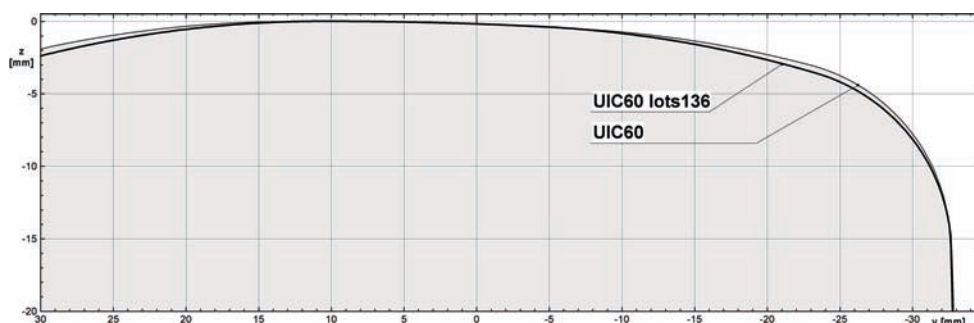
Důležitost dokonalého poznání vzájemné interakce vozidla a koleje se projevila při modernizaci tranzitních koridorů, kdy došlo k výměně kolejnic tvaru R 65 za nové s tvarem UIC 60 a ke změně úklonu kolejnic vůči rovině pražce z 1:20 na 1:40 (parametry koleje běžné v západní Evropě). Změna kontaktních podmínek spolu s velmi dobrou geometrickou polohou koleje po rekonstrukci koleje znamenala paradoxně zhoršení jízdních vlastností některých stávajících vozidel (jednalo se především o vozidla s volnou vazbou dvojkolí k rámu podvozku).

S tímto negativním jevem (tzv. nestabilní chod vozidel při vyšších rychlostech jízdy charakterizovaný intenzivním příčným kmitáním dvojkolí, rámu podvozku a skříně vozidla s frekvencí kolem 3÷5 Hz) je možné se setkat u některých starších vozidel i v současné době. Na obr. 3 je vidět záznam měřeného příčného zrychlení dvojkolí v koleji při jízdě rychlostí 140 km/h u osobního vozu starší konstrukce. V prvním případě (čárkovaná čára) je pohyb dvojkolí na mezi stability, kdy dochází k porušení energetické rovnováhy pohybu (mezi setrvačnými silami a momenty a dynamickou rovnováhou systému dvojkolí-vozdlo – skluzové poměry kolo-kolejnice – rychlost jízdy – tlumicí účinky ve vazbách). Ve druhém případě (souvislá čára) je pohyb dvojkolí již nestabilní, dvojkolí kmitá periodicky ve volném kanálu koleje, což kromě negativního vnímání cestujícími (snížení komfortu) znamená především vyšší příčné silové působení mezi vozidlem a kolejí (snížení bezpečnosti jízdy, zrychlení degradace geometrických parametrů koleje v příčném směru, zvýšené opotřebením kol i kolejnic).



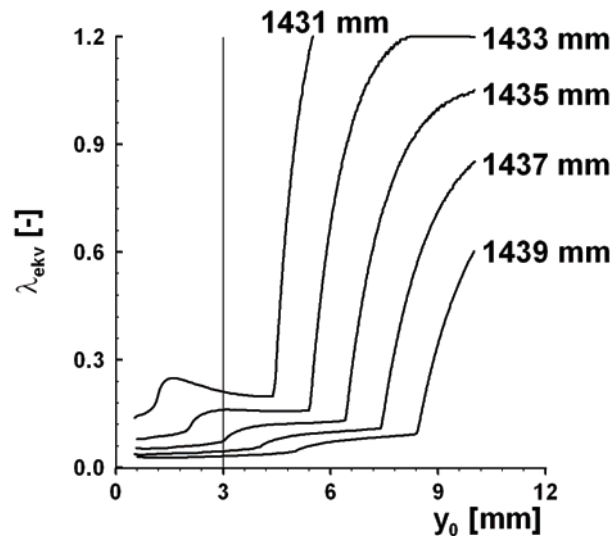
Obr. 3 Výsledky měření zrychlení dvojkolí v koleji v příčném směru

Určitým řešením vzniklého nepříznivého jevu neklidného chodu některých provozovaných vozidel bylo přebroušení původního příčného profilu hlavy kolejnice do modifikovaného tvaru UIC 60 lots136, který nepatrnou úpravou zakřivení vodící hrany hlavy kolejnice (viz obr. 4) umožnil změnu charakteristiky vazby dvojkolí-kolej zlepšení, resp. zachování přijatelných jízdních vlastností těchto vozidel v přímé koleji i při vyšších rychlostech jízdy. Tímto se také potvrdil fakt, že z hlediska vazby dvojkolí-kolej není důležitý úklon kolejnic, neboť broušením kolejnic lze docílit libovolné charakteristiky kontaktní geometrie dvojkolí-kolej.



Obr. 4 Srovnání původního a modifikovaného tvaru příčného profilu hlavy kolejnice (pozn.: nové označení kolejnice UIC 60 dle EN 13674-1 je 60 E1)

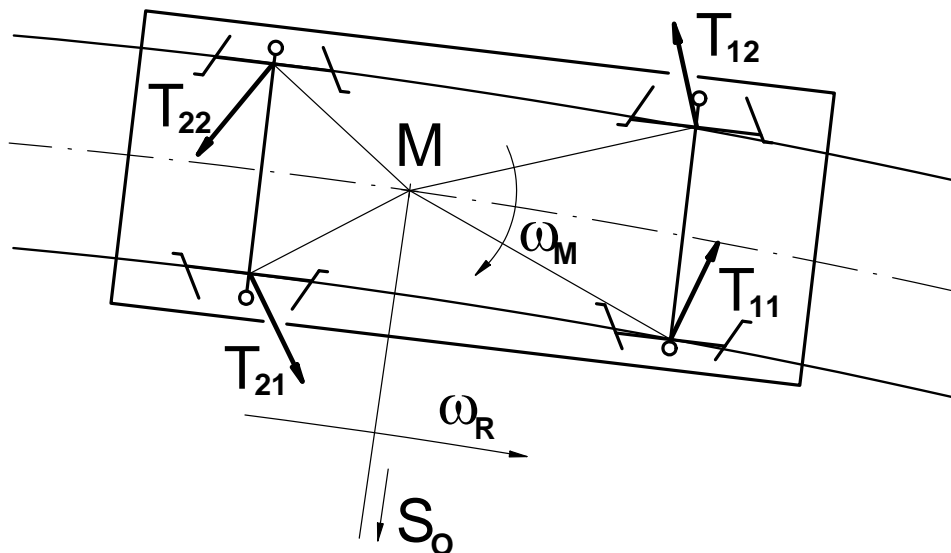
Kromě tvaru jízdních obrysů kol a příčných profilů hlav kolejnic je z hlediska zachování dobrých jízdních vlastností vozidel v přímé koleji nutné při konstrukci a údržbě koleje udržovat jmenovitou hodnotu rozchodu koleje (případně mírné rozšíření rozchodu koleje v rámci plusových tolerancí), neboť zúžením rozchodu dochází většinou k výraznému zvýšení hodnot ekvivalentní konicity a tedy větší náchylnosti vozidel k neklidnému chodu. Některé železniční správy proto přistupují k broušení speciálních příčných profilů hlav kolejnic, kterými rozšiřují rozchod koleje odebráním materiálu z vodící hrany kolejnice.



Obr. 5 Změny hodnot ekvivalentní konicity při změnách rozchodu koleje (kombinace jízdního obrysu kola ORE S1002 a příčného profilu hlavy kolejnice 60 E2)

6. Průjezd vozidla v oblouku koleje

Při jízdě vozidla obloukem vykonává vozidlo současně dva pohyby, jimiž si zachovává vzhledem k oblouku koleje tzv. kvazistatickou polohu. Jedná se o postupný pohyb vozidla jako celku po kruhové dráze oblouku a rotační pohyb kolem středu otáčení vozidla. Vlivem rotačního pohybu vozidla kolem středu otáčení vznikají v místech dotyku kol s hlavami kolejnic skluzové síly (třecí síly, viz obr. 6), jejichž velikosti jsou úměrné relativním skluzům kol po kolejnicích.



Obr. 6 Silové působení v kontaktu kol s kolejnicí při průjezdu vozidla obloukem

Při jízdě obloukem dochází na prvním dvojkolí vozidla ve směru jízdy k nalehnutí okolku vnějšího kola na vnější kolejnicový pás, které je ve většině případů spojeno se vznikem nepříznivého dvoubodového kontaktu kola s kolejnicí. Předstih bodu dotyku na okolku nepříznivě ovlivňuje třecí poměry mezi kolem

a kolejnicí a vede k intenzivnějšímu opotřebování vnější kolejnice i okolů kol. Druhé dvojkolí vozidla potom zaujímá buď polohu mezi oběma kolejnicovými pásy - poloha vozidla statická, nebo nabíhá na vnitřní kolejnicový pás - poloha vozidla vzpříčená, případně na vnější kolejnicový pás - poloha vozidla těživová.

6.1 Příčný skluz v kontaktní ploše kolo-kolejnice

Příčný skluz mezi kolem a kolejnicí je v oblouku přímo úměrný úhlu náběhu dvojkolí α . Snížení tohoto úhlu náběhu lze částečně řešit tzv. rejdovnými dvojkolými, jimiž je umožněna radiální stavitelnost v oblouku konstrukcí vedení dvojkolí (podélně měkké vedení nebo vedení s vůlemi) a primárního vypružení (např. pojezd UIC 517, podvozky DB 65, LEILA). Využitelné skluzové síly u těchto typů pojezdů, které pomáhají natáčet dvojkolí do radiální polohy, jsou určeny parametry kontaktu kola s kolejnicí (tvarem jízdních obrysů kol dvojkolí a tvarem příčných profilů hlav kolejnic) a jejich výsledná velikost je dána tuhostmi ve vedení dvojkolí a rozměrovými parametry vozidla.

Výrazné změny vlastností vedení dvojkolí (především tuhost vedení dvojkolí v podélném směru) u již provozovaných osobních a nákladních vozů, které jsou z převážné většiny vybaveny dvounápravovými podvozky (v České republice jsou zastoupeny typy 26-2.8, Y 25, Görlitz V, GP 200, SGP 300) za účelem sníženého silového působení při průjezdu oblouky malých poloměrů, nejsou prakticky možné (velký počet vozidel, požadavek unifikace pojezdů nákladních vozů). Navíc při požadavku na stabilitu jízdy těchto vozidel při vyšších rychlostech na přímých úsecích tratí, kdy je nutná poměrně tuhá vazba dvojkolí k rámu podvozku v podélném směru, je zřejmé, že vázaná dvojkolí v podvozku vždy zaujmou v oblouku koleje určitou polohu, která je odlišná od ideální polohy radiální.

6.2 Podélný skluz v kontaktní ploše kolo-kolejnice

Podélný skluz v dotykové ploše mezi kolem a kolejnicí je důsledkem nesplnění podmínky odvalování kola po kolejnici, která je dána rovností obvodové rychlosti na povrchu kola otáčejícího se dvojkolí a rychlosti jednotlivých kol vyplývající z postupného pohybu vozidla jako celku po kruhové dráze oblouku.

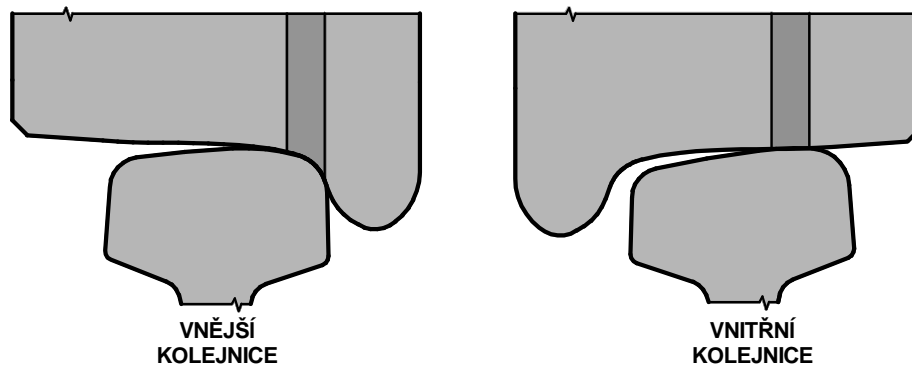
Rozdíl poloměrů kruhových drah oblouku je dán geometrií koleje, rozchodem koleje a jeho mezními odchylkami, který je po výstavbě trati minimálně ovlivnitelný. Naopak potřebného rozdílu poloměrů okamžitých valivých kružnic lze do jisté míry dosáhnout příčným posuvem dvojkolí ve volném kanálu koleje spolu s vhodně zvoleným jízdním obrysem kola a příčnými profily hlav kolejnic, které jsou určující pro průběh funkce Δr . Tuto optimalizaci vodících vlastností vozidel v oblouku koleje změnou kontaktních poměrů mezi kolem a kolejnicí je ale nutné řešit s ohledem na silové působení mezi vozidlem a kolejí a na jízdní vlastnosti vozidla v přímé koleji, zejména pak na již zmiňovanou stabilitu chodu vozidla.

6.3 Vodící vlastnosti vozidel v obloucích

Moderní kolejová vozidla jsou konstruována především pro provoz vyššími rychlostmi, a proto je pro zajištění stability jízdy snaha konstruovat v podélném směru vedení dvojkolí poměrně tuhé. V případě kombinace s nevhodným tvarem příčného profilu hlavy kolejnice (tvary kolejnic jsou navrhovány především pro zajištění

minimálního opotřebení a dobrých jízdních vlastností vozidel v přímé koleji) dochází v obloucích k intenzivnímu opotřebování vnější kolejnice a ke vzniku vlnkovitosti na vnitřní kolejnici. Zvyšováním rychlostí jízdy vozidel a zvyšováním hmotnosti na nápravu se negativní účinky tohoto jevu zvětšují.

V současné době je prováděn na Dopravní fakultě Jana Pernera výzkum možností ovlivnění těchto negativních jevů v obloucích malých poloměrů návrhem speciálního tvaru příčných profilů hlav kolejnic úpravou vazby dvojkolí-kolej [5] (viz obr. 7) pomocí simulačních výpočtů vodicích vlastností vozidel.



Obr. 7 Princip zlepšení kontaktních poměrů dvojkolí-kolej speciálním tvarem příčných profilů hlav kolejnic v oblouku koleje, tzv. asymetrické broušení

Výsledný navržený tvar speciálních příčných profilů hlav kolejnic (viz obr. 7) tak ve srovnání s kolejnicí tvaru 60 E2 při kombinaci s jediným používaným tvarem jízdních obrysů kol ORE S 1002 vytváří v obloucích malých poloměrů:

- vhodnější geometrické kontaktní poměry pro nabíhající kolo a vnější kolejnici. Při dvoubodovém dotyku snížením předstihu bodu dotyku na okolkou nabíhajícího kola dojde k výraznému snížení skluzové rychlosti na okolkou a tím i opotřebení okolkou a hlavy vnější kolejnice;
- strmější průběh funkce Δr . U nabíhajících dvojkolí tento průběh způsobí nárůst podélných skluzových sil, což se projeví příznivě především u vozů s vůlemi ve vedení dvojkolí nebo podélně měkčím vedením dvojkolí snížením úhlu náběhu a tím i vodicích sil na nabíhajících kolech. Na nenabíhajících dvojkolích strmější průběh funkce Δr naopak způsobí snížení podélných skluzových sil, které se podílejí na rozvoji vlnkovitosti vnitřní kolejnice.

Na základě teoretické analýzy i výsledků měření je ovšem důležité zmínit, že:

- efektivnost vynaloženého úsilí i finanční výhodnost používání speciálních příčných profilů hlav kolejnic je závislá na konkrétní situaci (trasování koleje, technologii dopravy, typech provozovaných vozidel);
- správná funkce použitých speciálních příčných profilů hlav kolejnic musí být spojena s jejich pravidelnou údržbou broušením, které je vhodné provádět v časovém intervalu nezbytném pro odstranění vlnkovitosti vnitřní kolejnice. Tím bude zaručeno, že nedojde ke zvyšování nákladů za broušení.

Porovnání výsledků provedených simulačních výpočtů jízdy vozidel oblouky malých poloměrů a analýza výsledků měření provedených v rámci dosavadního výzkumu prokázala vhodnost speciálních příčných profilů hlav kolejnic v obloucích malých poloměrů. Výsledkem práce je také nalezení a potvrzení úzké vazby mezi

změnou (postupnou při opotřebování kolejnic nebo řízenou při broušení kolejnic) kontaktních podmínek dvojkolí-kolej a mezi ostatními parametry koleje (rychlostí změn geometrických parametrů koleje, nárůstem vlnkovitosti, opotřebením), což svědčí o nutnosti plánování údržbových zásahů na základě podrobné analýzy dostupných naměřených dat.

Pokud by se mělo provést porovnání ekonomické výhodnosti broušení speciálních příčných profilů hlav kolejnic, je nutné vyčíslit všechny náklady, které vznikají na straně dopravní cesty (broušení kolejnic, výměna intenzivněji opotřebovaných kolejnic, poškozených upevňovadel či pružných podložek, prasklých pražců a rozdrčeného šterku, provádění podbíjení, zajištění výlukové činnosti, lidské práce) i na straně vozidel (soustružení a výměna do okolků opotřebených kol, opravy poškozených částí upevněných na neodpružených částech vozidla apod.).

7. Závěr

Byť jsou úpravy tvaru příčných profilů hlav kolejnic nebo jízdních obrysů kol ve srovnání s celkovými rozměry kol a kolejnic zanedbatelné, mohou podstatným způsobem ovlivnit výsledné silové působení mezi vozidlem a kolejí, které znamená mnohdy bezpečnější provoz a nižší celkové náklady na údržbu jednotlivých částí.

LITERATURA:

- [1] IZER, J., ZELENKA, J.: „Charakteristiky kontaktní geometrie“, Scientific Papers of the University of Pardubice, Series B, s. 39-62, Pardubice, 1996, ISSN 1211 6610.
- [2] ČSN EN 14363: „Železniční aplikace - Přejímací zkoušky jízdních charakteristik železničních vozidel - Zkoušení jízdních vlastností a stacionární zkoušky“, Český normalizační institut, 2006.
- [3] ČSN EN 15302: „Metody stanovení ekvivalentní konicity“, Český normalizační institut, 2008.
- [4] UIC 518: „Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behaviour - Safety - Track fatigue - Running behaviour“, UIC, 2009.
- [5] KOHOUT, M.: „Výzkum kontaktní geometrie dvojkolí kolej při průjezdu vozidel oblouky malých poloměrů“, Disertační práce, Univerzita Pardubice, 2009.
- [6] IZER, J.: „Vozidlo a kolej“, Vědeckotechnický sborník ČD 7/1999, GŘ ČD Praha, ISSN 1214-9074.

Lektoroval: Ing. Ladislav Kopsa, SŽDC, Praha