

PŘECHODOVÉ DĚJE VE VALIVÉM KONTAKTU KOLA A KOLEJNICE

Petr VOLTR, Michael LATA

Katedra dopravních prostředků a diagnostiky, Dopravní fakulta Jana Pernera, Univerzita Pardubice

1. Úvod

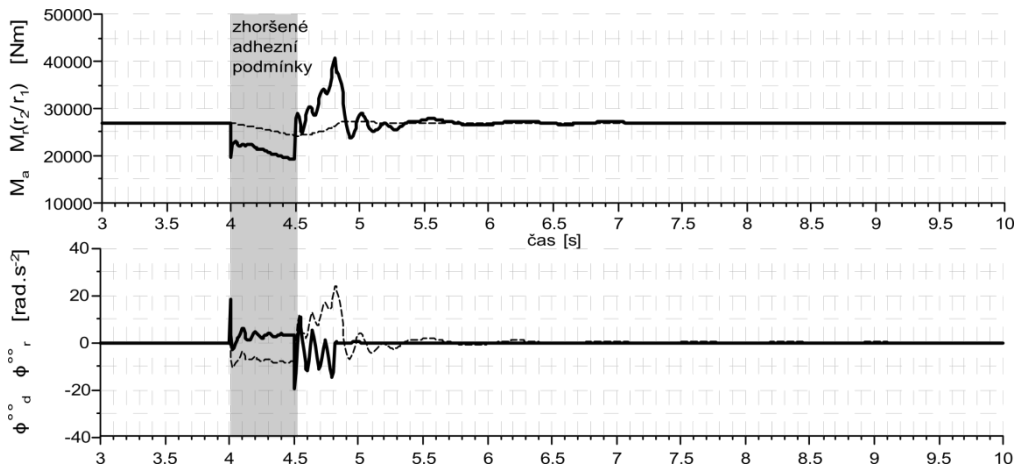
Zabýváme-li se chováním dynamických soustav (mezi něž kolejová vozidla samozřejmě patří), pozorujeme ustálené stavy a přechodové děje. Při přechodovém ději se soustava nachází v nestabilním stavu – v průběhu změny vyvozené nějakou vnější změnou – a blíží se nové rovnováze. Objevuje se kmitání, jež může mít (např. ve spojení s rezonancí) nepříznivé důsledky. Cílem sledování přechodových dějů je poznání kinematického chování soustavy, poznání silových a momentových účinků a citlivosti soustavy na změnu vnějších parametrů.

Tento článek je zaměřen na mechanické přechodové děje v pohonech kolejových vozidel [1]. Tyto systémy zahrnují trakční motory, dvojkolí a všechny mechanické součásti, které je spojují (hřídele, spojky, převody atd.), jakož i systém regulace motorů a adhezní vazbu kol a kolejnic. Zvláštní pozornost zde bude věnována přechodovým dějům přímo v kontaktu kola a kolejnice, kde klíčovým pojmem je *přechodové valení*.

2. Přechodové děje v pohonu kolejových vozidel

Na hnacím kolejovém vozidle dochází často ke vzniku přechodových dějů v soustavě pohonu vlivem změny vnějších parametrů. Dochází ke krátkodobému rozkmitání torzní soustavy. Protože soustava pohonu není soustavou izolovanou, nýbrž je vázána na další části vozidla, kmitání se přenáší prostřednictvím vazeb do ostatních částí vozidla (může být například vnímáno strojvedoucím na stanovišti).

Tyto jevy lze studovat a hodnotit experimentálně – na skutečných vozidlech či na zkušebních stavech v laboratorních podmínkách. Alternativou jsou simulační výpočty, obvykle s vícečetným modelem (MBS, multi-body system) v časové oblasti. Příklad výstupu takové simulace je na obr. 1. Navozováním přechodového děje pomocí změny vnějších parametrů dosáhneme u soustavy časové změny souřadnic, jejich časových derivací a časové změny sil a momentů ve vazbách, ať už uvnitř soustavy pohonu, nebo ve vazbách na celé vozidlo. Z praktického hlediska by výchytky a síly neměly překročit přípustné hodnoty a přechodový děj by měl být v krátkém čase utlumen.



Obr. 1 Ukázka dynamického chování pohonného systému v proměnných adhezních podmínkách – výstup ze simulace. Nahoře adhezní a hnací moment, dole úhlové zrychlení dvojkolí a rotoru.

V případě pohonu dvojkolí považujeme za významný přechodový děj změnu skluzových poměrů, která následně způsobí rozkmitání či naopak utlumení kmitavých pohybů. V krajním případě vede k překročení meze adheze. Patří sem i tzv. zpětný děj, kdy se soustava navrácí k původním podmínkám, čili do původního rovnovážného stavu. Hlavní případy vzniku přechodového děje je možné rozdělit podle příčin, jež je způsobují:

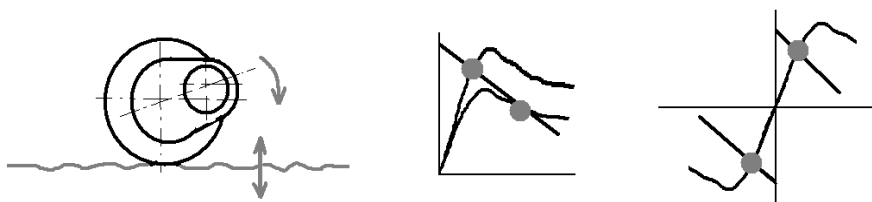
- **Silové/momentové účinky**, tj. změny hnacího momentu vyvozené zásahem strojvedoucího nebo automatického regulačního systému.
- **Kinematické účinky**, zejména buzení nerovnostmi koleje – významné u pohonů se silnou vazbou rotačních a svislých pohybů (svislá závěska nápravové převodovky). Vliv je ještě silnější, nachází-li se systém poblíž meze adheze.
- **Tribologické účinky** – změny součinitele adheze/tření, typickým případem je průjezd úsekem tratě s odlišnými adhezními podmínkami.

K torznímu kmitání pohonu dvojkolí dochází často v těchto základních případech (viz obr. 2):

- Vliv reálných vertikálních nerovností trati, působících jako kinematické buzení.

- Spolupráce charakteristiky hnacího motoru s adhezní charakteristikou. Impulzem k vybuzení soustavy do přechodového (krátkodobě nestabilního) stavu je změna adhezních podmínek (například listí, námraza, mastnota na kolejnicích).
- Zvláštním případem je spolupráce charakteristiky motoru a adhezní charakteristiky při přechodu do motorového brzdění a zpět, čili změně znaménka hnacího momentu. Do této skupiny můžeme zařadit též vliv kolísání hnacího momentu při řazení jízdních stupňů.

Abychom byli schopni simulovat tyto jevy, je zapotřebí rozumět všem jejich mechanismům. Jedním z nich je kontakt kola a kolejnice se skluzy a skluzovými silami, jež jsou plošným integrálem tečného napětí, které se v čase mění.



Obr. 2 Ilustrace k základním příčinám vzniku přechodových dějů v dynamice pohonu dvojkolí

3. Přechodové děje v kontaktu kola a kolejnice

Při valení se skluzem je v kontaktní ploše kola a kolejnice rozděleno normálové a tečné napětí, jehož výslednicemi jsou normálové a tečné síly. Napětí v každém bodě plochy závisí nejen na okamžitých skluzových podmínkách, ale na jejich kumulativním účinku v průběhu doby, kdy se bod nacházel uvnitř oblasti dotyku. Z toho plyne, že valení má rovněž své přechodové děje.

Ustálené valení je kinematicky definováno jako valení s nulovou časovou derivací rozdílu výchylek částic v kontaktu [2]. Současně však musí být neměnné další podmínky, např. kontaktní geometrie, normálová síla a součinitel tření. V takovém případě potom lze rozložení tečného napětí počítat pro ustálené valení a za jistých zjednodušujících předpokladů jej lze i analyticky integrovat [3, 4]. Adhezní charakteristiky jsou rovněž definovány pouze pro ustálené valení.

Ve výpočtech se obvykle předpokládá ustálené valení, a to i při vyšetřování dynamických přechodových jevů v pojezdu. Tento předpoklad lze přijmout díky tomu, že přechodový děj valení trvá obvykle velmi krátkou dobu – srovnatelnou s dobou, během níž kolo postoupí o délku kontaktní oblasti. Např. pro rychlost jízdy 50 km/h je tento čas v řádu 1 ms, což je podstatně méně než trvání vyšetřovaných (mechanických, elektrických) přechodových dějů v soustavě vozidla. Pro vyšetřování jízdních vlastností vozidel je přechodové valení prakticky bez významu. V dynamice pohonných soustav však může být zapotřebí simulovat jízdu vozidla velmi nízkou rychlostí. V takovém případě roste význam přechodového valení, předpoklad ustáleného stavu není vhodný

a může dokonce vést ke zjevným chybám (zejména v okamžiku prvního pohybu vozidla z klidu).

Přechodové valení lze řešit Kalkerovým přesným algoritmem CONTACT, který však není příliš vhodný pro přímé užití v simulačních výpočtech, neboť je časově náročný. Zjednodušený a rychlý FASTSIM předpokládá ustálené valení. Proto byl vyvinut *zjednodušený model přechodového valení* (STR, angl. Simplified model of Transient Rolling). Využívá Hertzovu teorii a výstupkový model povrchových vrstev těles (jak to činí i jiné zjednodušené modely), avšak nepřijímá předpoklad ustáleného valení. Princip modelu, jeho využití v simulaci a srovnání s experimenty je popsáno v [5]. Ukázalo se, že model umožňuje reprodukovat podstatné jevy pozorované v situacích výrazně odlišných od ustáleného valení. Ve své aktuální implementaci ve výpočetním softwaru se STR omezuje na podélný skluz bez skluzu příčného a spinového, což je nicméně pro potřeby dynamiky pohonů dostačující.

U přechodového valení je důležitým pojmem vývoj rozložení tečného napětí. Příklady takového vývoje jsou uvedeny v [2, 6, 7] – to jsou však jen výsledky kinematicky zadaných problémů. V následujícím oddílu je popsáno několik případů přechodového valení zaznamenaných v dynamické simulaci jízdy vozidla.

4. Přechodové valení v simulačním výpočtu

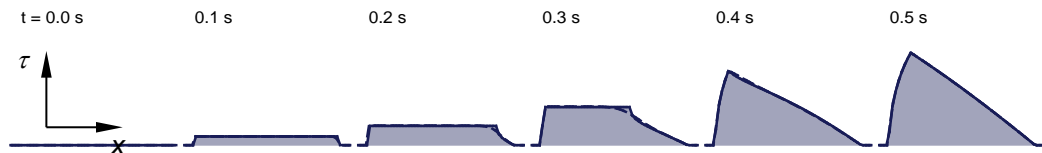
Jednoduchý model o dvou stupních volnosti

Přechodové valení je nejvýraznější v okamžiku rozjezdu z nulové rychlosti. Předně budiž tento jev ukázán na jednoduchém rovinném modelu o dvou stupních volnosti, reprezentujícím část vozidla (dvojkolí nesoucí jednu hmotu). Hnací moment je předepsán lineární rampou, jež během 0,5 s dosáhne z nuly zadané konečné hodnoty, jež je dále udržována beze změny. Kontaktní geometrie a svislé zatížení odpovídá běžné lokomotivě, tečná síla se počítá pomocí STR. K výpočtu je využit vlastní software naprogramovaný v prostředí Delphi.

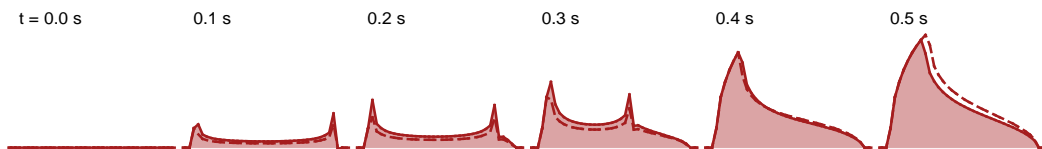
Vývoj napětí v kontaktu připomíná scénář „Od Cattanea k Carterovi“ [6, 7]: zpočátku tečné napětí narůstá rovnoměrně prakticky v celé oblasti dotyku a postupuje vzad velmi pomalu. Jak výsledná síla narůstá, vozidlo zrychluje a původní rozložení napětí se odsouvá z kontaktu; od náběžné hrany se utváří nové rozložení, jež po ustálení hnacího momentu brzy konverguje k ustálenému stavu.

Vývoj rozložení je patrný z obr. 3, zahrnujícího výsledky STR i CONTACTu. Je třeba poznamenat, že se nejedná o porovnání dvou nezávislých řešení – ve výpočtu přesným algoritmem [7] byly využity výstupy ze zjednodušené simulace, stejně jako např. SIMPACK může využít CONTACT ve fázi postprocesingu [8]. Jednou sloužila jako vstup tečná síla, podruhé průběh skluzu. Skutečnost, že rozdíl mezi výsledky obou těchto výpočtů (v nákrese plnou a čárkovanou čarou) je malý, lze brát jako potvrzení použitelnosti zjednodušeného modelu. Jak je patrné z obrázku, zásadní rozdíl mezi zjednodušenou a přesnou teorií je přítomen, ale celkový charakter děje se neliší.

STR



CONTACT



Obr. 3 Rozložení tečného napětí (v podélném řezu) při rozjezdu z nulové rychlosti – výsledky simulace s nejjednodušším vozidlovým modelem

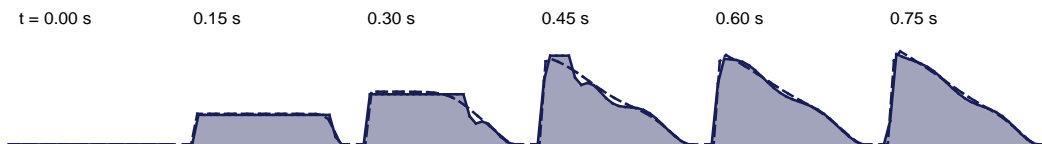
Model celé lokomotivy

Dále byly provedeny výpočty s kompletním modelem lokomotivy. Model je tvořen rovinnou soustavou tuhých těles propojenou s modelem elektrického trakčního obvodu pro výpočet momentu motorů. Pro výpočet byl využit stejný software jako u předchozího příkladu. Tečné síly mezi koly a kolejnicemi byly opět řešeny pomocí STR.

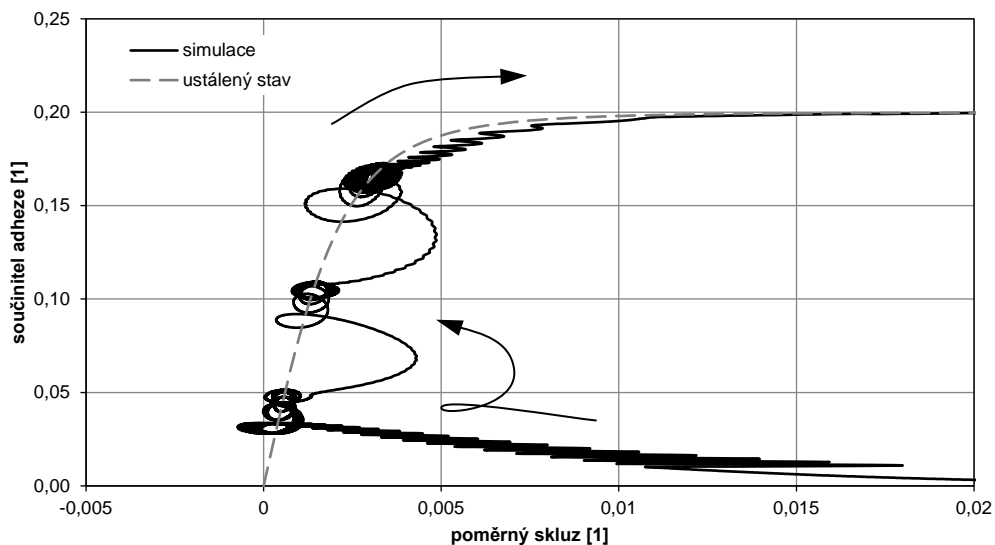
V tomto případě se lokomotiva rozjíždí z klidu s vozy o celkové hmotnosti 1200 t. Statický součinitel tření je $f_0 = 0,2$, teoretická tuhost výstupkového modelu je násobena redukčním součinitelem $k_{\text{red}} = 0,5$. Protiskluzová ochrana a pneumatické vyrovnávače nápravového zatížení jsou vyřazeny z provozu.

První přechodový děj je pozorován, když je vozidlo uvedeno do pohybu. Moment motoru nenarůstá skokem, nýbrž postupně, vzhledem k indukčnosti v obvodu. Moment přenášený na dvojkolí nadto zahrnuje periodickou složku danou torzními kmity hnacího hřídele. Tím je ovlivněn i průběh skluzu. Vývoj rozložení tečného napětí (obr. 4) je podobný jako v předchozím případě (obr. 3), ale napětí narůstá od náběžné hrany ve vlnách. Toto zvlnění je jasně patrné, použije-li se v STR algoritmus s pohyblivou sítí; diskretizace s pevnou sítí má tendenci vlny vyhlazovat, ale rozdíl ve výsledné síle je zanedbatelný.

Stojí za povšimnutí, jak se tento přechodový děj jeví v adhezní charakteristice (obr. 5). Pracovní bod postupuje k ustálené adhezní charakteristice z oblasti velmi nízkého součinitele adheze při vysokém skluzu. Tento průběh se může zdát jako porušení zavedených adhezních teorií a vyvolávat otázky, jak může být síla tak malá, ač skluz je tak velký, že to musí znamenat plný prokluz. Ve skutečnosti však ke klouzání téměř nedochází. Adheze ještě není vyčerpána, tečná síla a deformace teprve narůstá z počáteční nulové hodnoty. Zde je třeba zcela opustit představu ustáleného valení.



Obr. 4 Vývoj rozložení tečného napětí při rozjezdu z nulové rychlosti – simulace s modelem celé lokomotivy



Obr. 5 Závislost součinitele adheze na skluzu při rozjezdu před dosažením plného prokluzu – záznam ze simulace; pro srovnání je vyznačena i ustálená adhezní charakteristika

Každá změna jízdního stupně vyvolá odchylení od ustálené adhezní charakteristiky. Pracovní bod se potom ve smyčkách vrací k ustálenému stavu. Regulace této lokomotivy je stupňovitá, pomocí předřadných odporů; u pohonu s plynulou regulací by byly výchylky z ustáleného stavu podstatně menší. Vlak postupně zrychluje, avšak strojvedoucí řadí tak rychle, že na čtvrtém stupni je dosažena mez adheze.

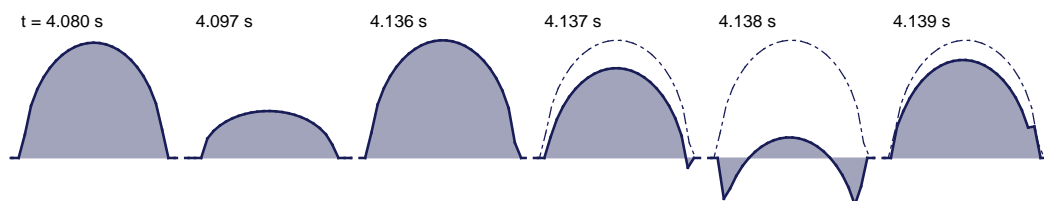
Chování pohonné soustavy na mezi adheze záleží na adhezních podmínkách a na parametrech mechanického systému (např. torzní tuhost a tlumení hnacího hřídele). Za podmínek daných v této simulaci je v počáteční fázi zaznamenán *přerušovaný prokluz*, při němž se v kontaktu uplatňuje tzv. stick-slip efekt, vyskytuje se samobuzené kmitání. Rozložení tečného napětí je patrné z obr. 6. V přerušovaném prokluzu se periodicky opakují tyto fáze:

- prokluz s nízkou skluzovou rychlostí (první náčrt na obr. 6);
- urychlování rotace kola, plný prokluz s vysokou skluzovou rychlostí, pokles součinitele tření (druhý náčrt);
- zpomalování rotace, plný prokluz s nízkou rychlostí (třetí náčrt);

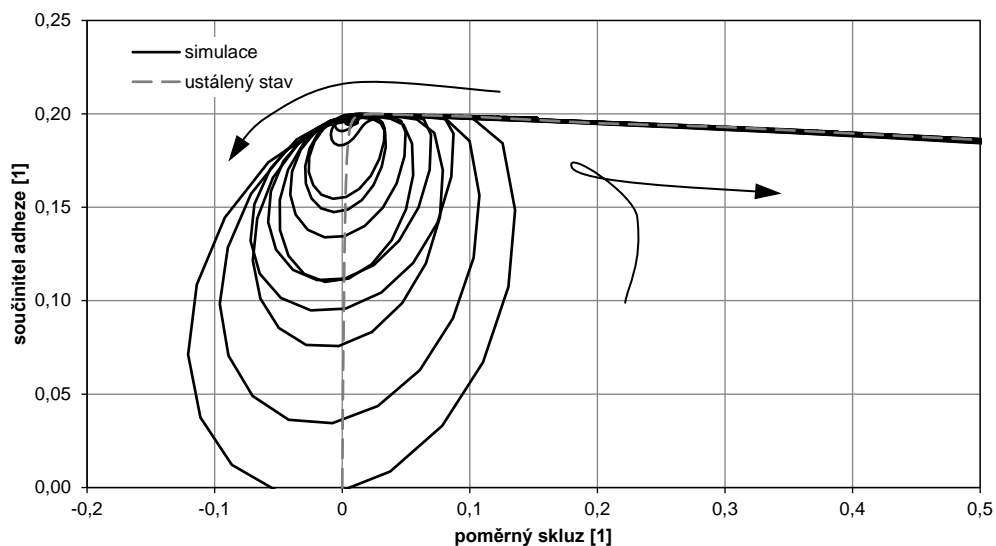
- fáze lpění s poklesem a následným nárůstem tečného napětí.

Zaznamenaná závislost součinitele adheze na skluzu je vykreslena na obr. 7. Pracovní bod se po většinu doby nachází na sestupné větvi. Ve fázích lpění (jež jsou poměrně krátké) jsou zaznamenány výrazné smyčky kolem vzestupné větve. Z tohoto grafu, stejně jako z vývoje tečného napětí, je zřejmé, že simulovaná situace se ustálenému valení příliš nepodobá.

Je-li umožněno pokračování prokluzu, fáze lpění vymizí a nastoupí nepřerušované klouzání. Skluzová rychlost narůstá a stále osciluje, avšak znovu nulové hodnoty nedosáhne, dokud se podmínky nezmění nebo se neučiní opatření pro ukončení prokluzu.



Obr. 6 Vývoj rozložení tečného napětí při přerušovaném prokluzu; čerchovanou čarou je vyznačena mez tečného napětí



Obr. 7 Závislost součinitele adheze na skluzu v režimu přerušovaného prokluzu – záznam ze simulace

5. Závěr

V dynamické soustavě kolejového vozidla se vyskytují všemožné přechodové děje. První část tohoto článku se obecněji věnuje přechodovým dějům v dynamice pohonných

soustav; dále je text zaměřen na přechodové děje přímo v kontaktu kola a kolejnice. Tyto děje mohou být v mnoha úlohách dynamiky vozidel krátké a nedůležité, přesto však jsou hodny pozornosti: modelování přechodového valení, třebaš zjednodušené a omezené na podélný skluz, umožnilo autorům simulovat jízdu vozidla libovolně proměnnou rychlostí – včetně velmi nízkých rychlostí, což by stěží bylo možné s modelem ustáleného valení.

Z výstupů simulací byly pro svou odlišnost od ustáleného stavu zvoleny dvě situace: rozjezd z klidu a přerušovaný prokluz. První je běžným provozním režimem, druhá je nežádoucí, avšak vyskytnout se může. Nákresy rozložení tečného napětí a zaznamenané adhezní charakteristiky ukazují, jak se při těchto přechodových dějích vyvíjí silové účinky v kontaktu kola a kolejnice.

Poděkování

Výzkum byl podporován Technologickou agenturou České republiky v rámci projektu č. TA02030776 a Univerzitou Pardubice v rámci projektu č. SG530001.

Poznámka:

Tento text je českou verzí příspěvku „Transient Problems in Rolling Contact of Wheel and Rail“, publikovaného a předneseného na mezinárodní konferenci BOGIE '13 v Budapešti, 9.–12. 9. 2013.

Literatura

1. LATA, M.: The modern wheelset drive system and possibilities of modelling the torsion dynamics. *Transport* 2008, 23(2), s. 172–181.
2. KALKER, J. J.: Survey of Wheel–Rail Rolling Contact Theory. *Vehicle System Dynamics* 5 (1979), s. 317–358.
3. KALKER, J. J.: Simplified theory of rolling contact. *Delft Progress Report*, Series C, 1 (1973), s. 1–10.
4. POLÁCH, O.: Creep forces in simulations of traction vehicles running on adhesion limit. *Wear* 258 (2005), s. 992–1000.
5. VOLTR, P. – LATA, M.: Dynamical behaviour of a locomotive drive system at the adhesion limit. *22nd International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks – Proceedings [CD]*. Manchester Metropolitan University, 2011.
6. KALKER, J. J.: A Minimum Principle for the Law of Dry Friction, Part 2: Application to Nonsteadily Rolling Elastic Cylinders. *Transactions ASME, Journal of Applied Mechanics* 38 (1971), s. 881–887.
7. VOLLEBREGT, E. A. H.: *User guide for CONTACT, Vollebregt & Kalker's rolling and sliding contact model*. Version 12.2. Delft: VORtech Computing, 2012. URL: <<http://www.kalkersoftware.org/downloads/user-guide.pdf>>.
8. VOLLEBREGT, E. A. H. – WEIDEMANN, CH. – KIENBERGER, A.: Use of “Contact” in multi-body vehicle dynamics and profile wear simulation: Initial results. *22nd International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks – Proceedings [CD]*. Manchester Metropolitan University, 2011.

Resumé

PŘECHODOVÉ DĚJE VE VALIVÉM KONTAKTU KOLA A KOLEJNICE

Petr VOLTR, Michael LATA

Dynamický systém vozidla a koleje není vždy v ustáleném stavu – jsou pozorovány přechodové děje. Úvodní část článku se věnuje přechodovým dějům obecně a zaměřuje se na ty, jež se vyskytují v dynamice pohonných soustav. Dále je pozornost věnována kontaktu kola a kolejnice a problémům přechodového valení. Tyto problémy nelze řešit pomocí kontaktních modelů, které předpokládají ustálené valení. Proto byl vyvinut zjednodušený model přechodového valení, který byl dále využit v simulacích. V závěrečné části článku jsou představeny výsledky v podobě nákrešů rozložení tečného napětí a zaznamenaných adhezních charakteristik.

TRANSIENT PROBLEMS IN ROLLING CONTACT OF WHEEL AND RAIL

Petr VOLTR, Michael LATA

The vehicle-track dynamical system is not always in steady state but transient phenomena are often observed. The initial part of the paper deals with transient phenomena in general view and focuses on those occurring in driving system dynamics. Further, attention is paid to wheel–rail contact and the problems of transient rolling. This situation cannot be handled by contact models which assume steady rolling. Therefore a simplified model of transient rolling has been developed and utilised in simulations. The results are presented in the final part of the paper in the form of traction distribution plots and creepage–force diagrams.