

SCIENTIFIC PAPERS
OF THE UNIVERSITY OF PARDUBICE

Series B

The Jan Perner Transport Faculty

2 (1996)

URČOVÁNÍ ORIENTOVANÝCH ADHEZNÍCH CHARAKTERISTIK

Jaroslav ČÁP

Katedra dopravních prostředků

Získávání věrohodných vstupních údajů, zejména pro simulační postupy, je pro cílený výsledek rozhodující.

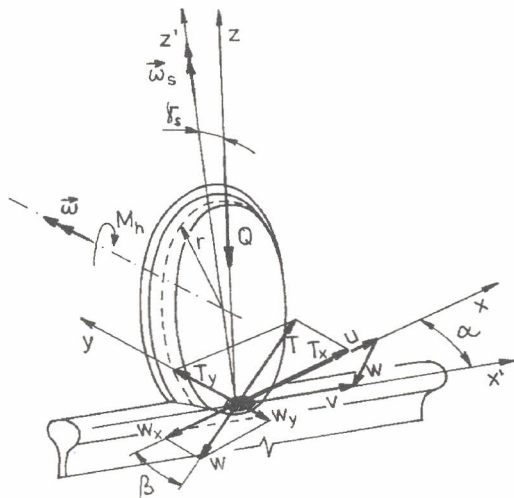
Týká se to zejména adhezního mechanismu kolejových vozidel, kterým jsou realizovány tečné síly ve styku kola s kolejnicí.

Zde je základní charakteristikou adhezní křivka, se svou vzestupnou a sestupnou větví a to buď ve formě rychlostní skluzové charakteristiky $\mu = f(w)$ nebo obecné skluzové charakteristiky $\mu = f(s)$. Tedy závislost součinitele odheze na relativní rychlosti nebo skluzu.

Ve všeobecném povědomí jsou adhezní charakteristiky pro podélný a případně ještě pro příčný směr, v nichž se realizují příslušné tečné; trakční, brzdě resp. příčné síly. Orientace se odvíjí od os x , y , z , kdy směr x je uvažován v podélné ose (vozidla, kola), směr y pak jako příčný a z jako svislý.

Menší je již informovanost o charakteristikách příčně-podélných, které spektrum znalostí o mechanismu adheze rozšiřují. Obecně se proto dá hovořit o orientovaných adhezních charakteristikách.

Vydeme-li z obr. 1, kdy kolo je odchýleno od osy koleje o úhel α , jsou v obrázku zachyceny příslušné skluzové rychlosti w_x , w_y a výsledná w a tomu odpovídající tečné síly T_x , T_y a T , při existenci svislé zatěžovací síly Q .



Obr. 1

Pro ozřejmení uvedme definici skluzových rychlostí:

$$w_x = u - c \cos \alpha ; \quad w_y = v \sin \alpha,$$

kde u je obvodová rychlost kola [m/s]

v je postupná rychlost kola (rychlost kola v ose kolejnice) [m/s]

a platí

$$w = \sqrt{w_x^2 + w_y^2}.$$

Pro definici relativního skluzu platí $s_x = w_x/v$, $s_y = w_y/v$ a $s = \sqrt{s_x^2 + s_y^2}$ s rozměrem [1 event. . x 100 = %].

Vlastní adhezní charakteristika je obecně vyjádřena vztahem $T_x = \mu_x \cdot s_x$, $T_y = \mu_y \cdot s_y$ a $T = \sqrt{T_x^2 + T_y^2}$ a to ve všech případech, kdy neuvažujeme - při menších hodnotách kuželovitosti jízdního profilu kola - vliv spinu. Obecně lze v orientovaných směrech (x a y) definovat skutečné rychlosti částic např. kola jako

$$u_{xs} = u_x + \frac{\partial u_x}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial t} = u_x + \frac{\partial u_x}{\partial x} \cdot u_x + \frac{\partial u_x}{\partial y} \cdot u_y$$

analogicky

$$u_{ys} = u_y + \frac{\partial u_y}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial u_y}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial t} = u_y + \frac{\partial u_y}{\partial x} \cdot u_x + \frac{\partial u_y}{\partial y} \cdot u_y$$

což přepíšeme

$$u_{xs} = u_x + \varepsilon_{xu} \cdot u_x + \gamma_{xyu} \cdot u_y$$

$$u_{ys} = u_y + \varepsilon_{yu} \cdot u_y + \gamma_{yxu} \cdot u_x,$$

kde jsou ε_i deformace $\partial u_i / \partial_i$ a γ_{ij} zksoy $\partial u_i / \partial_j$.

U trakčních vozidel kde je $u_x > u_y$ se vztahy dále zjednodušují na

$$u_{xs} = u_x + \varepsilon_i u_x$$

resp.

$$u_{ys} = u_y + \gamma_{xy} \cdot u_x$$

a přítomnost obvykle plastizovaného materiálu lze vyjádřit

$$u_{xs} = u_x + (\varepsilon_x + \varepsilon_{xp}) \cdot u_x$$

$$u_{ys} = u_y + (\gamma_{xy} + \gamma_{xyp}) \cdot u_x.$$

Obdobně bychom získali vztahy pro skluzové rychlosti částic koleje (tedy i rychlosti pohybu vozidla) v_{is} a příslušnou skluzovou rychlost w_{is} jako rozdíl $(u_{is} - v_{is})$, kdy za předpokladu $\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_i$ resp. $\gamma_{xy} = \gamma_{yx} = \gamma_{ij}$ platí

$$w_x = (u_x - v_x) + (\varepsilon_i + \varepsilon_i)(u_x - v_x) + (\gamma_{ij} + \gamma_{ij})(u_y - v_y)$$

$$w_y = (u_y - v_y) + (\varepsilon_i + \varepsilon_i)(u_y - v_y) + (\gamma_{ij} + \gamma_{ij})(u_x - v_x).$$

Pro jednodušší případ, kdy $u_x \rightarrow u$, $u_y \rightarrow 0$, ε_{ip} resp. $\gamma_{ijp} \rightarrow 0$, $v_x = v \cdot \cos \alpha$ a $v_y = v \cdot \sin \alpha$, lze vzorce přepsat

$$\Delta s_x = +\varepsilon_i \frac{(u - v \cos \alpha)}{v} + \gamma_{ij} \frac{v \sin \alpha}{v}$$

$$\Delta s_y = -\varepsilon_i \frac{v \sin \alpha}{v} + \gamma_{ij} \frac{(u - v \cos \alpha)}{v}$$

kdy platí

$$\Delta s_x = \varepsilon_i \cdot s_x + \gamma_{ij} \cdot s_y$$

$$\Delta s_y = -\varepsilon_i \cdot s_y + \gamma_{ij} \cdot s_x,$$

což jsou příslušné změny skluzu v dotykovém místě při uvažované pružnosti materiálu. Takto koncipovaný výpočet při znalosti dílčích skluzů, při odhadu součinitele tření v částicích styku vede na výpočet elementárních smykových a tečných sil. Jejich integrací pak ke stanovení příslušných tečných sil a zpětně příslušného součinitele adheze. Bohužel pro tento postup chybí zcela nebo částečně jednoznačné údaje o součiniteli tření, změnách modulu pružnosti v povrchových vrstvách, anisotropie a případné plastizace materiálu a podobně.

Podstatně schůdnější postup však umožňuje cesta pomocí experimentu s využitím přepočtových vztahů. Totiž vlivem specifických vlastností materiálů,

užitím technologie výroby a obrábění, zjišťujeme určité odchylky od ideálních průběhů orientovaných adhezních charakteristik. Značně se projevuje i vliv plastizace materiálu v povrchových vrstvách. Přesto ale rozdíly nejsou natolik velké, abychom nemohli přijmout představu o jednotném průběhu úplné adhezní charakteristiky ať již obecné, nebo rychlostní, kdy vycházíme z naměřených průběhů jak ve směru podélném (x), tak i příčném (y); a uvádíme náhradní jednotný průběh. Pro jednoduchost pak zavedeme označení rychlostní skluzové charakteristiky $\mu = f(w)$ jako $\mu_s(w)$ a obecné skluzové charakteristiky $\mu_s = f(s)$ jako $\mu_s(s)$.

Výsledné skluzové rychlosti w i skluzu s jsou dány výše uvedenými vzorci a v případě, že úhel α je v praktických případech relativně malý, můžeme je zapsat ve formě

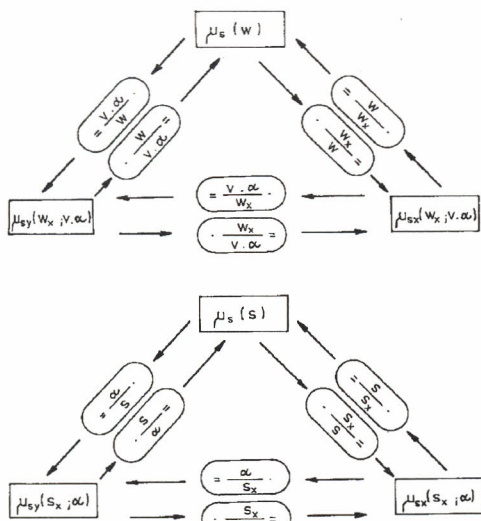
$$w = \sqrt{w_x^2 + (v \cdot \alpha)^2}$$

$$s = \sqrt{s_x^2 + \alpha^2}$$

Souvislost mezi základní obecnou charakteristikou $\mu_s(w)$ resp $\mu_s(s)$ a odvozenými tj. podélnými μ_{sx} resp. příčně - podélnými μ_{sy} vychází ze vztahu

$$\mu_{s(w)} = \sqrt{\mu_{sx}^2(w_x; v \cdot \alpha) + \mu_{sy}^2(w_x; v \cdot \alpha)}$$

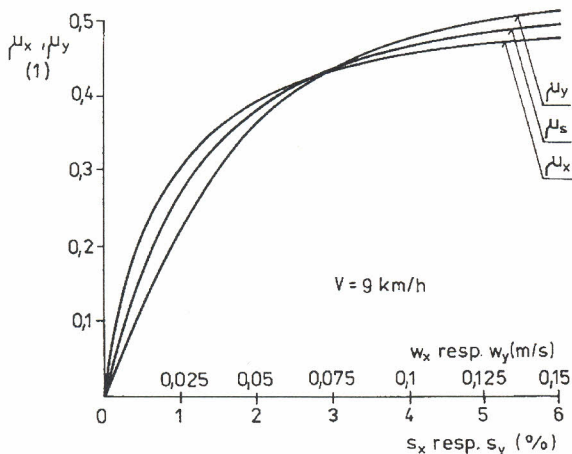
$$\mu_{s(s)} = \sqrt{\mu_{sx}^2(s_x; \alpha) + \mu_{sy}^2(s_x; \alpha)}$$



Obr. 2

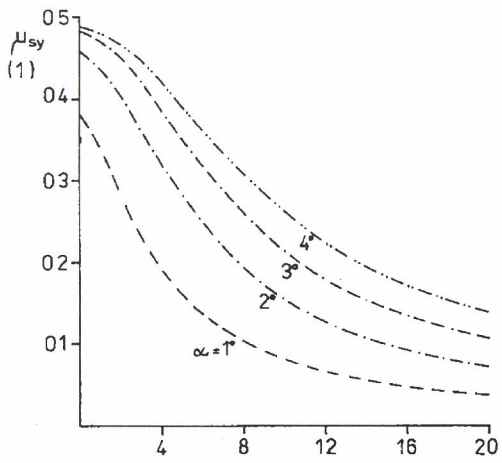
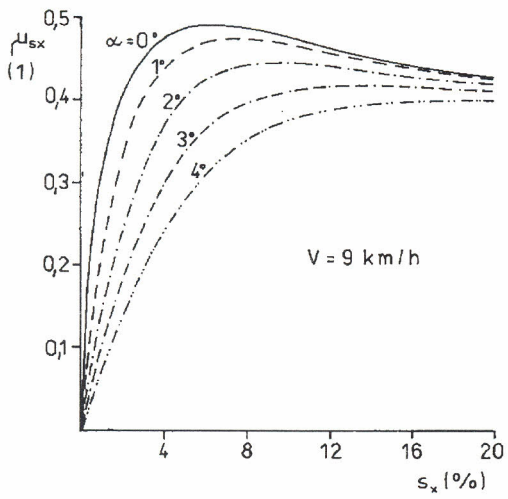
Z toho již je možné stanovit přepočtové vztahy - které platí inverzně - jak je znázorněno na obr. 2.

Celá metoda má rozhodující základ v ověřené adhezní charakteristice. Autor takový podklad získal z měření na modelovém adhezním stavu, kde na obr. 3 je zakreslena zjištěná vzestupná větev charakteristiky.

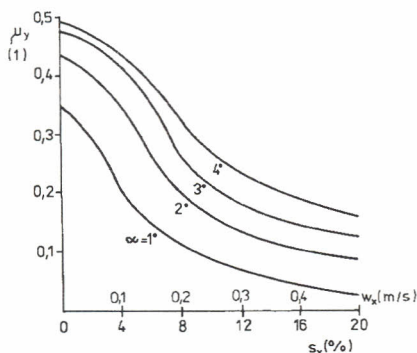
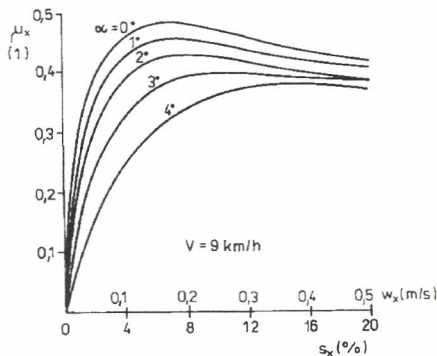


Obr. 3

Provedené přepočty jsou pro úhly $\alpha = 1, 2, 3$ a 4° zakresleny na obr. 4 a současně byly křivky ověřovány na zkušebním zařízení při postupném nastavování úhlu α - obr. 5.



Obr. 4



Obr. 5

Porovnáním vypočtených a naměřených výsledků je zřejmé z obr. 6, kdy můžeme konstatovat poměrně dobrou shodu obou metod.

Výpočtová metoda dovoluje dále stanovit příslušné změny strmosti $c_{\mu w}$ resp. $c_{\mu s}$ počáteční fáze vzestupu první větve charakteristiky $\mu_{sx} = f(s_x)$, pro α v intervalu $\langle 0^\circ, 4^\circ \rangle$ i s příslušnými regresními vztahy s vysokým koeficientem korelace

$$\alpha = 0^\circ \quad c_{\mu w} = 10,5 \quad c_{\mu s} = 26,2$$

$$\alpha = 1^\circ \quad c_{\mu w} = 8,0 \quad c_{\mu s} = 20,0$$

$$\alpha = 2^\circ \quad c_{\mu w} = 5,0 \quad c_{\mu s} = 12,5$$

$$\alpha = 3^\circ \quad c_{\mu w} = 3,5 \quad c_{\mu s} = 8,7$$

$$\alpha = 4^\circ \quad c_{\mu w} = 2,5 \quad c_{\mu s} = 6,2$$

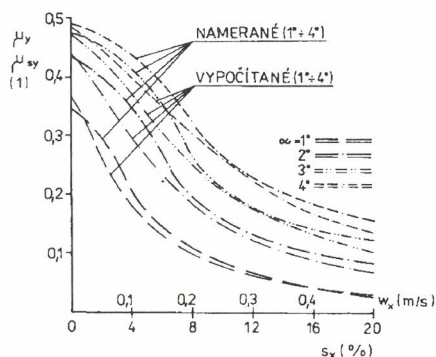
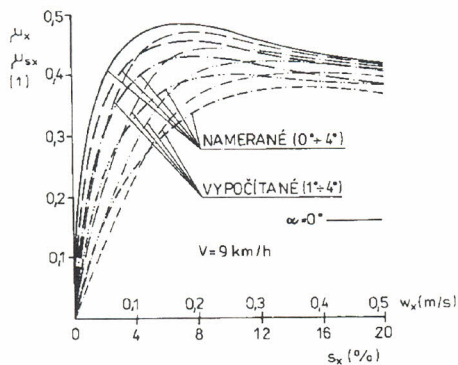
$$c_{\mu w} = 10,0 - 2,05 \cdot \alpha; \quad c_{\mu s} = 24,98 - 5,13 \cdot \alpha; \quad (r_{xy} = -0,980).$$

Dále pokles maximálně dosažitelného součinitele adheze

$$\mu_{sx \max} = 0,490 - 0,023 \cdot \alpha \quad (r_{xy} = 0,997)$$

a střední hodnoty maximálně dosažitelného součinitele adheze v podélném směru s příslušnou směrodatnou odchylkou

$$\bar{x}_{\mu_{sx \max}} = 0,444 ; \quad \sigma_{\mu} = 0,036$$



Obr. 6

U vypočtených příčně podélných charakteristik - zde jen v intervalu $\alpha \in (1^\circ, 4^\circ)$ je maximálně dosažitelný součinitel adheze

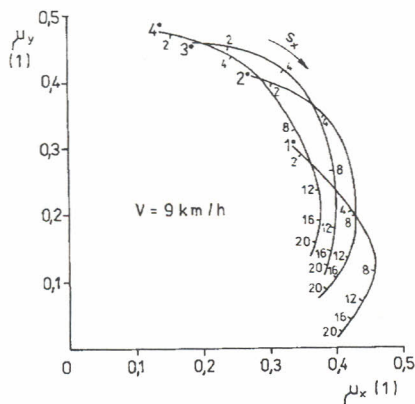
$$\mu_{sy \max} = 0,342 + 0,039 \cdot \alpha \quad (r_{xy} = 0,943)$$

střední hodnota maximálně dosažitelného součinitele

$$\bar{x}_{\mu_{sy \max}} = 0,440 ; \quad \sigma = 0,046$$

Ze vzájemného porovnání naměřených a početně stanovených křivek lze konstatovat následující. Podélné charakteristiky vykazují u vypočtených křivek menší strmosti $c_{\mu W}$ resp. $c_{\mu S}$. Hodnoty maximálně dosažitelného součinitele jsou vyšší. U příčně-podélných vypočtených charakteristik jsou maximálně dosažitelné hodnoty poměrně blízké experimentálnímu výsledku, ale jejich pokles je strmější.

Nové poznatky přináší charakteristiky vzájemných vztahů orientovaných součinitelů adheze μ_x , μ_y na parametru skluzu s_x , pro jednotlivé hodnoty úhlu α , zakreslené na obr. 7.



Obr. 7

Nebyl řešen aproximační tvar křivek, je však možné jednotlivé body $(\mu_{x1}, \mu_{y1}) \dots (\mu_{xn}, \mu_{yn})$ zapsat např. ve formě polynomu, kdy platí

$$\mu_y = a_0 + a_1 \mu_x + \dots + a_n \mu_x^n \text{ a tedy}$$

$$\mu_y = a \cdot \mu_x,$$

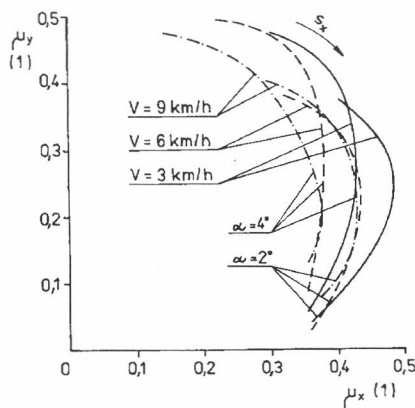
kde

$$a = \mu_s \cdot \mu_{xn}^{-1}$$

a tedy

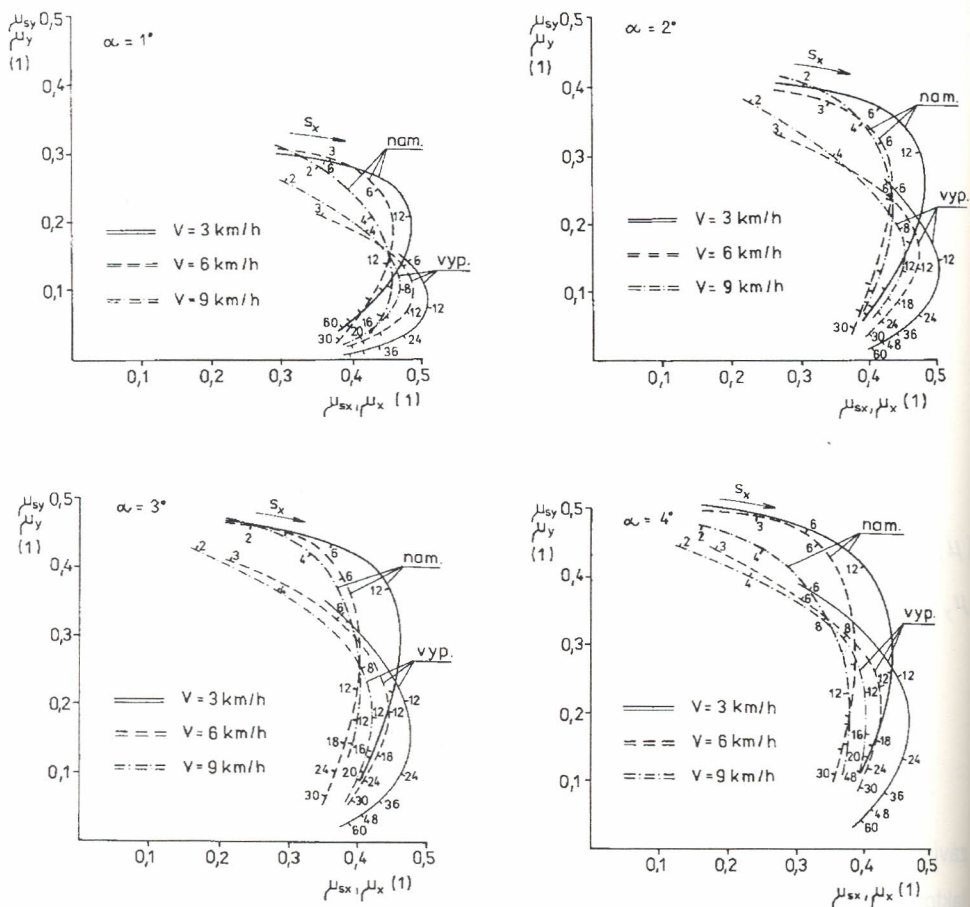
$$\mu_x = \mu_y \cdot \mu_{xn}^{-1} \cdot \mu_s.$$

Z obr. 7 je možné pak vysledovat nejen interaktivní charakter působení α na závislosti $\mu_y = f(\mu_x)$ pro $V = \text{konst.}$, ale i interaktivní vliv souběžně působících faktorů α i V , jak je ukázáno na obr. 8.



Obr. 8

Zajímavá jsou porovnání na obr. 9, vyjadřující závislost příčného a podélného součinitele adheze na úhlu α a relativním podélném skluzu s_x .



Obr. 9

Použijeme-li vztah pro úhlovou odchylku ξ vektorů $\vec{\mu}$ a \vec{s} , kdy platí vztah

$$\xi = \arctg \frac{\mu_y}{\mu_x} - \arctg \frac{s_y}{s_x},$$

získáme u vypočtených charakteristik odchylky $\xi = \pm 0,5^\circ$, což je v podstatě dáno nepřesností odečtených hodnot. Tedy u vypočtených charakteristik souhlasí směry výsledných vektorů $\vec{\mu}$ a \vec{s} na rozdíl od změřených, kde jsou odchylky podstatně vyšší (v rozmezí cca $2 \div 6^\circ$ a zásadně kladné), což znamená, že vektor $\vec{\mu}$ má vždy vyšší hodnotu než vektor \vec{s} . Zjištěná velikost anisotropie svědčí jen

o mírných rozdílech v orientovaných adhezních vazbách, což může být objektivním měřítkem třecích vlastností reálných povrchů kola a kolejnice. Současně lze pozorovat u naměřených charakteristik nižší úroveň μ_y při srovnatelné úrovni μ_x . Body zvratu vykazují stejnou tendenci.

Celkově můžeme konstatovat relativně malé odchylky, zvláště s ohledem na to, že se jedná o hodnocení děje s náhodným charakterem. Ani při laboratorních experimentech, při konstantních parametrech pokusu, nelze dosáhnout jednoznačnou reprodukovatelnost výsledků. Lze tedy přijmout metodu přepočtu skluzových charakteristik. Rozhodně se tak nabízí lepší možnost pro získávání spolehlivého průběhu adhezní charakteristiky než přejímání některých neověřených, často zastaralých, podkladů.

Metoda přepočtu dovoluje posoudit účinek i dalších souběžně působících vlivů, např. kombinaci proměnné normálové kolové síly, úhlu šikmého chodu ap. Výhodně jde použít regresní vzorce pro odhady hodnot maximálního součinitele adheze, strmostí pracovní vzestupné větve, ap. Navržená metoda dovoluje posoudit i vliv dalších souběžně působících vlivů, např. kombinací časově proměnné normálové síly i úhlu šikmého chodu kola na výslednou charakteristiku. Tím se rozšiřují poznání v té části adhezní problematiky, která doposud nebyla spolehlivě prozkoumána.

Poznámka: Příspěvek byl vypracován v rámci prací na výzkumné úloze GAČR - č. 101/94/1389.

Lektoroval: Ing. Karel Sellner, CSc.

Předloženo v říjnu 1996.

Literatura

- [1] Čáp, J.: Adhezní charakteristiky ve styku kola s kolejnicí. DDP, VŠDS Žilina 1986.
- [2] Čáp, J., Polách, O.: Výzkum adheze a výsledky dosažené na VŠDS. Železniční technika 1983, č.6, str. 274.

Resumé

URČOVÁNÍ ORIENTOVANÝCH ADHEZNÍCH CHARAKTERISTIK

Jaroslav ČÁP

V příspěvku jsou ukázány možnosti stanovování dalších orientovaných adhezních charakteristik při ověřené znalosti alespoň jedné z nich. Metoda umožňuje jednak přesnější výsledky, než přijímání některých, často zastaralých, podkladů, jednak dovoluje posoudit i účinek dalších souběžně působících vlivů na změny průběhu adhezních křivek.

Summary

DETERMINATION OF THE ORIENTATED ADHESION CHARACTERISTICS

Jaroslav ČÁP

In this paper results of studies concerning the determination of the other orientated adhesion characteristics, having obtained a proved knowledge of one of these, are presented. The method offers on the one hand the more accurate results than accepting some (often out-of-date) data, and on the other hand allows to consider also the influence of further concurrent effects on changes of the distribution of adhesion curves.

Zusammenfassung

ZUR BESTIMMUNG DER ORIENTIERTEN ADHÄSIONSCHARAKTERISTIKEN

Jaroslav ČÁP

Im Beitrag werden die Möglichkeiten zur Festlegung von weiteren orientierten Adhäsionscharakteristiken dargestellt, falls wenigstens eine der Charakteristiken bekannt ist. Die Methode ermöglicht einerseits genauere Ergebnisse als die Übernahme einiger, oft veralteter Unterlagen, andererseits erlaubt sie auch die Auswirkung von weiteren gleichzeitig wirkenden Einflüssen auf die Verlaufsänderung der Adhäsionskurven zu beurteilen.