

PROMĚNNÁ NÁPRAVOVÁ SÍLA A TENDENCE DEFORMACÍ ADHEZNÍCH CHARAKTERISTIK

Jaroslav ČÁP

Katedra dopravních prostředků

Ideální adhezní charakteristika, tedy závislost součinitele adheze na relativním skluzu $\mu = f(s)$ resp. $\mu = f(w)$, je platná pro ideální styk kola s kolejnicí. V praxi však tento stav neexistuje, protože nerovnosti kolejí vyvolávají změnu normálové zátěžové síly a zejména ovlivňují rozjezd kolejového vozidla, kdy jsou adhezní nároky největší.

Na modelovém zkušebním zařízení jsme se pokusili tento fenomén vlivu proměnné síly prozkoumat. Zařízení bylo postaveno na základě podobnostní teorie a jeho možnosti při studiu adheze jsou uvedeny v [1]. Studována byla jízda vozidla do rychlosti cca 10 km/hod.

Proměnná normálová síla byla vyvozována hydraulickým vlnovcovým zatěžovacím zařízením, kdy byla generována sinusová složka přítláčné síly volitelné amplitudy a frekvence, která se superponovala k základnímu statickému zatížení kola Q_0 .

Výslednou časově proměnnou normálovou sílu $Q(t)$ lze vyjádřit vzorcem

$$Q(t) = Q_0 (1 + \delta \cdot \sin 2\pi \cdot f_k \cdot t),$$

kde δ je amplituda změny zatížení a platí

$$\delta = (Q_{\max} - Q_0) / Q_0, \quad [1]$$

a f_k je frekvence periodické změny [Hz].

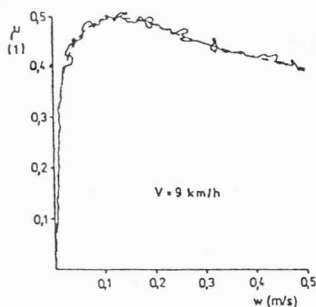
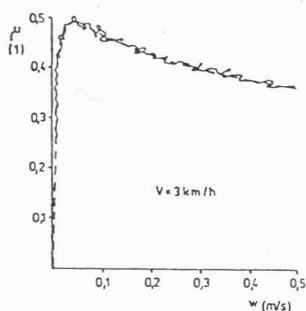
Pro pokusy byly voleny tyto parametry:

- $Q_0 = 5 \text{ kN}$ (síla na celé dvojkolí $Q_{do} = 10 \text{ kN}$)
- $\delta = 0; 0,3; 0,5; 0,7$
- $f_k = 0; 5; 10; 15 \text{ Hz}$

při rychlosti jízdy

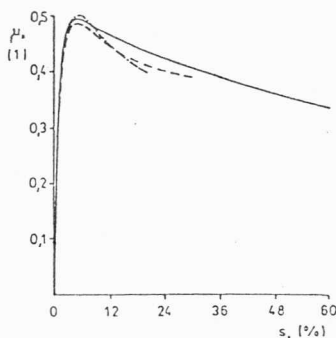
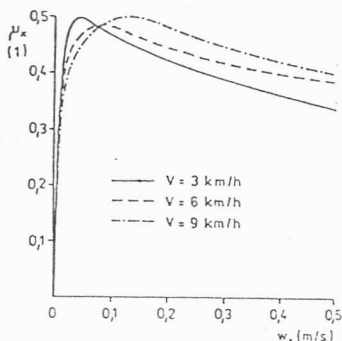
– $V = 3, 6, 9 \text{ km/h}$.

Na obr. 1 je zakreslen skutečný průběh skluzové charakteristiky pro $V = 3$ a 9 km/h . Takto je získávána v experimentálních výzkumech jak v laboratoři, tak i na vozidlech. Jde o tzv. nevyhlazenou podobu rychlostí skluzové charakteristiky, kde se projevují vzájemné nerovnoměrnosti součinitele adheze a skluzové rychlosti, způsobené postupným uvolňováním vazby ve vzestupné větvi a vlivem samobuzených kmitů v sestupné části charakteristiky. Pro praktickou potřebu však používáme vyhlazené skluzové charakteristiky, které respektují průběh ve střední hodnotě původní křivky.



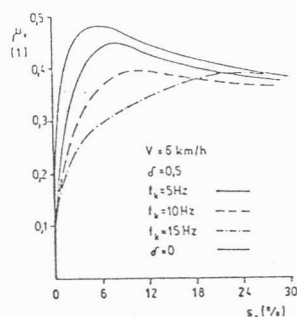
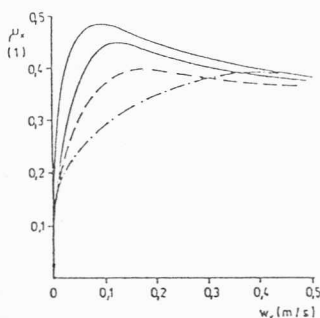
Obr. 1

Na obr. 2 jsou souhrnně zakresleny adhezní charakteristiky pro $V = 3, 6, 9 \text{ km/h}$ pro $Q(t) = \text{konst} = Q_0$.



Obr. 2

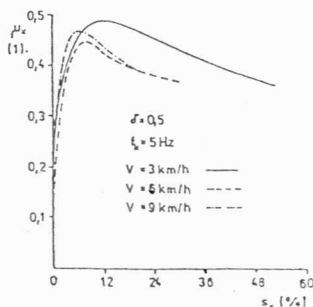
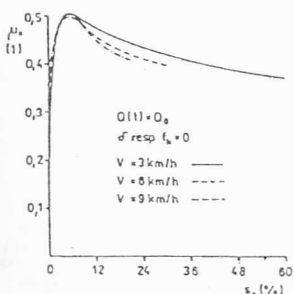
Poznatky z vlivu proměnné determinované síly $Q(t)$ názorně ukazuje obr. 3. Jde o adhezní charakteristiky pro $V = 6 \text{ km/h}$, pro $\delta = 0,5$ a $f_k = 0, 5, 10, 15 \text{ Hz}$.



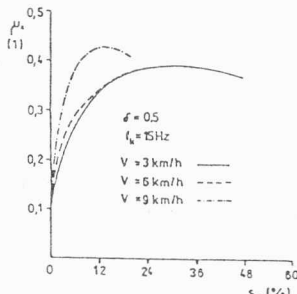
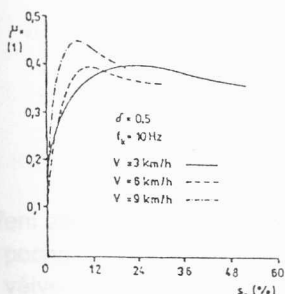
Obr. 3

Všechny jednoznačně dokumentují tendenci deformací základních skluzových křivek, kdy se zhoršením dynamických podmínek ve styku kola s kolejnicí dochází k snižování maximálně dosažitelného součinitele adheze s růstem hodnoty skluzové rychlosti, resp. relativního skluzu. Vysvětlení tohoto jevu, nejmarkantnějšího právě u determinovaného $Q(t)$, lze hledat ve vzniku dílčích prokluzů probíhajících v periodě změny zátěžové síly.

Na svodných obr. 4 a 5 je pro $\delta = 0,5$ a $f_k = 5, 10, 15 \text{ Hz}$ ukázán vliv rychlosti $V = 3, 6, 9 \text{ km/h}$, který jednoznačně naznačuje stabilizující účinek zvýšené rychlosti na adhezní charakteristiky. Zvýšená rychlost se projevuje zvýšením účinku setrvačných sil bránících vzniku dílčích prokluzů.



Obr. 4



Obr. 5

Bližšímu zkoumání byla podrobena vzestupná větev adhezních charakteristik, při parametrech přitlačné síly $Q(t)$. Na obr. 6, 7 a 8 je pro $V = 6 \text{ km/h}$ sledován průběh střední,

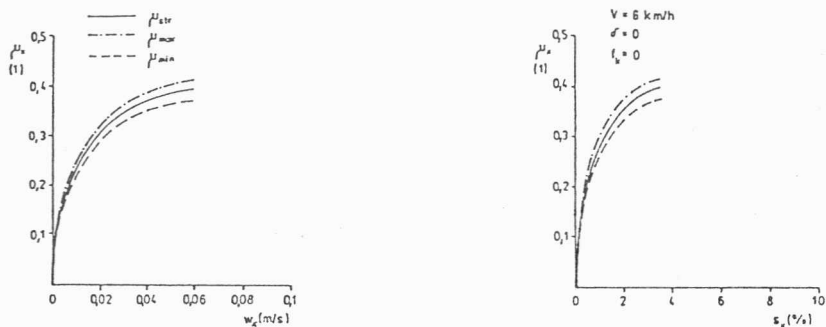
maximální a minimální hodnoty součinitele adheze - $\mu_{stř}$, μ_{max} , μ_{min} , které byly odečítány z oscilografických záznamů $Q(t)$ a $T(t)$, přičemž jsme definovali:

$$\mu_{stř} = T_{stř} / Q_0; \quad \mu_{max} = T_{max} / Q_{max} \quad \text{a} \quad \mu_{min} = T_{min} / Q_{min}.$$

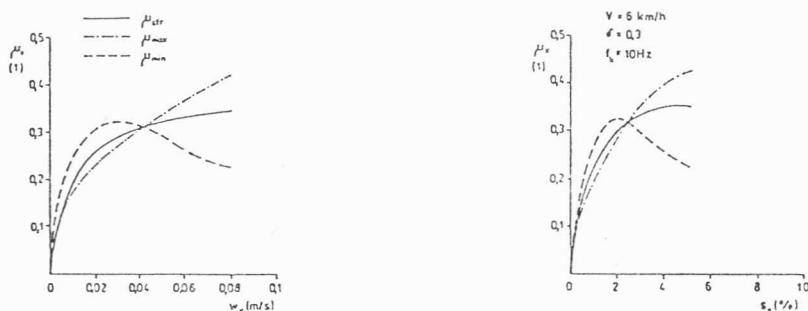
V případě, že $\delta = 0$ (obr. 6), jsou odchylky μ_{max} i μ_{min} nepatrné a sledují průběh $\mu_{stř}$. Jiná situace nastává při záměrné změně přítláčné síly - $\delta = 0,3$; $f_k = 10 \text{ Hz}$ - obr. 7 a $\delta = 0,5$; $f_k = 10 \text{ Hz}$ - obr. 8, kdy můžeme pozorovat vznik uzlového bodu $\mu_{stř} = \mu_{max} = \mu_{min}$.

Vysvětlení lze hledat v souladu s poznatkami o existenci přechodového pásma a uvolňování vazby ještě ve vzestupné větvi. V pásmu pod uzlovým bodem se potvrzuje známý fakt, že součinitel adheze je větší při menší přítláčné síle, tedy ve smyslu definice platí $|\mu_{min}| > |\mu_{stř}| > |\mu_{max}|$. V pásmu nad uzlovým bodem již odlehčení nemůže vyvolat zvýšení součinitele adheze, naopak dojde ke zvýšení $\underline{w}$ resp. $\underline{s}$ a k poklesu μ_{min} . Naopak zvýšení přítláčné síly může ještě vyvolat realizaci tečné síly v oblasti efektivní s nárůstem μ_{max} . Celý děj je však provázen celkovým nárůstem registrované hodnoty $\underline{w}$ a $\underline{s}$ a celkovým poklesem registrované hodnoty součinitele adheze.

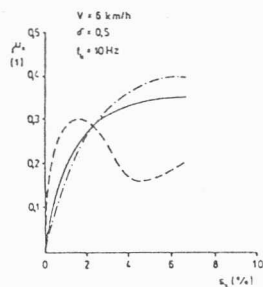
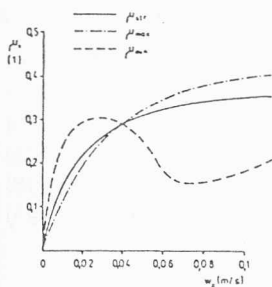
Velmi užitečné jsou pro praktickou potřebu uzavřené křivky adhezních charakteristik, kdy byl zjišťován průběh součinitele adheze se zvyšováním a opětovným snižováním $\underline{w}$ resp. $\underline{s}$. Hovoříme tu o tzv. vratných skluzových charakteristikách, které byly zjišťovány za ideálních podmínek styku kola s kolejnicí ($\delta = 0$). Souhrnně jsou výsledky na obr. 9 a 10.



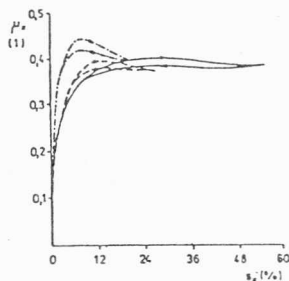
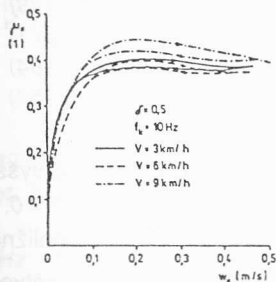
Obr. 6



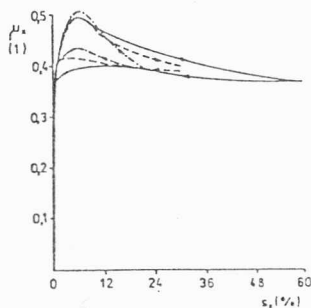
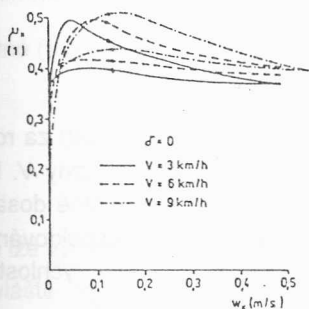
Obr. 7



Obr. 8



Obr. 9



Obr. 10

Měření za ideálních podmínek ($\delta = 0$) - obr. 9 - vykazují relativně velký odstup křivky zpětného pochodu od základní křivky a dokumentují nemožnost návratu na horní křivku sestupné větve. Za zhoršených dynamických podmínek - obr. 10 - se rozdíly vratných charakteristik významně snižují. Znalost průběhů vratných adhezních charakteristik je nutná pro návrh efektivních regulačních systémů řízení pohonu.

Statistické vyhodnocení a regresní vyjádření vratných adhezních charakteristik je následující:

Pro ideální podmínky styku kola s kolejnicí ($\delta = 0$) platí pro sestupné větve (při zvyšování skluzové rychlosti w) a pro zpětné křivky (snižování w), podle obr. 9, tyto závislosti:

$V = 3 \text{ km/h}$	$\mu = 0,491 \cdot \exp(-0,674 \cdot w)$	$(r_{xy} = -0,976)$
	$\mu = 0,406 \cdot \exp(-0,286 \cdot w)$	$(r_{xy} = -0,968)$
$V = 6 \text{ km/h}$	$\mu = 0,508 \cdot \exp(-0,547 \cdot w)$	$(r_{xy} = -0,975)$
	$\mu = 0,424 \cdot \exp(-0,237 \cdot w)$	$(r_{xy} = -0,985)$
$V = 9 \text{ km/h}$	$\mu = 0,567 \cdot \exp(-0,702 \cdot w)$	$(r_{xy} = -0,998)$
	$\mu = 0,462 \cdot \exp(-0,351 \cdot w)$	$(r_{xy} = -0,993)$

Pro zhoršené podmínky styku ($\delta \neq 0$), podle obr. 10, platí:

$V = 3 \text{ km/h}$	$\mu = 0,416 \cdot \exp(-0,263 \cdot w)$	$(r_{xy} = -0,999)$
	$\mu = 0,390 \cdot \exp(-0,133 \cdot w)$	$(r_{xy} = -0,884)$
$V = 6 \text{ km/h}$	$\mu = 0,426 \cdot \exp(-0,426 \cdot w)$	$(r_{xy} = -0,999)$
	$\mu = 0,403 \cdot \exp(-0,185 \cdot w)$	$(r_{xy} = -0,971)$
$V = 9 \text{ km/h}$	$\mu = 0,467 \cdot \exp(-0,287 \cdot w)$	$(r_{xy} = -0,994)$
	$\mu = 0,432 \cdot \exp(-0,174 \cdot w)$	$(r_{xy} = -0,954)$

Ze vztahů plyne zjištění, že rozdíly pro $\delta = 0$ jsou absolutně i relativně vyšší než pro $\delta \neq 0$. S růstem V však klesají. Hodnoty exponentů jsou pro $\delta = 0$ vyšší než u $\delta \neq 0$. Absolutní rozdíly v exponentech se pro $\delta = 0$ s rychlostí zvyšují, zatím co pro $\delta \neq 0$ jsou přibližně stejné.

U vratných charakteristik dochází k posuvu hodnoty w pro μ_{max} u spodní větve. Hodnota posuvu je pro $\delta = 0$ pozitivní (cca 0,02 m/s), pro $\delta \neq 0$ je hodnota negativní. S rychlostí V se v obou případech prakticky nemění.

Poznámka:

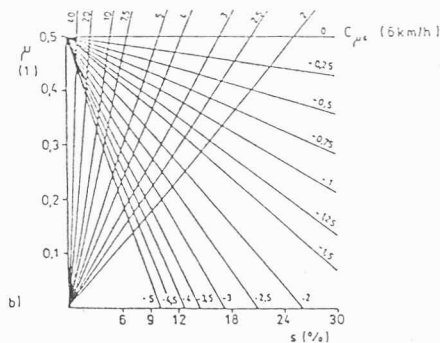
Výše uvedené vzorce je možné přepočítat jako funkční závislost relativního skluzu $\underline{s}$ (kdy $-k_1 \cdot w = -k_1 \cdot v \cdot s = -k_1^x \cdot s$).

Celkově můžeme z měření věnovaných determinovanému průběhu $Q(t)$ za rozhodující označit faktory relativní amplitudy δ , frekvence zátěžové síly f_k a rychlost jízdy V . První dva faktory zvyšují průměrnou hodnotu w_x a s_x při současném poklesu maximálně dosažitelného součinitele adheze μ_{max} . Zvýšená hodnota w_x a s_x má za následek, při respektování statické a kinematické třecí charakteristiky, snížení součinitele adheze. Zvýšená rychlost jízdy se projevuje stabilizačním účinkem bránícím deformaci skluzové charakteristiky.

Zjištěné vlivy se dají pozorovat i na změně strmosti první části vzestupné větve charakteristiky, kdy můžeme v rychlostní skluzové charakteristice určit $c_{\mu w}$ resp. v obecné skluzové charakteristice $c_{\mu s}$.

Z obr. 1 resp. 2 pro základní charakteristiky jsou to strmosti:

$V = 3 \text{ km/h} - c_{\mu w} = 32,0 \text{ [s/m]}$	;	$c_{\mu s} = 26,6$	[1]
$6 \text{ km/h} - c_{\mu w} = 16,5$	;	$c_{\mu s} = 27,5$	
$9 \text{ km/h} - c_{\mu w} = 10,5$	;	$c_{\mu s} = 26,5$	



Porovnáme-li nyní změny strmostí za působení determinované změny $Q(t)$, zjistíme např. z obr. 3, že pro $V = 6 \text{ km/h}$ při $\delta = 0,5$ jsou tuhosti pro jednotlivé f_k následující:

Z výsledků lze sestavit lineární regresní závislost změny strmosti, která je např. pro $V = 6 \text{ km/h}$ a $\delta = 0,5$ dána obecně vztahy:

a konkrétně (s příslušným součinitelem korelace):

resp.

Podobně lze vyhodnotit změny strmostí i v sestupné větvi charakteristiky.

$$\mu_{\max} = \mu_{\max 0} - k_f \cdot f_k,$$

která podle obr. 3 - pro $V = 6 \text{ km/h}$ a $\delta = 0,5$ je:

Vyhodnocením i ostatních měření lze uvést i souhrnnou tabulku ukazující vliv relativní amplitudy δ na pokles $\mu_{\max}$ ve formě směrnice $k_{\omega\delta}$. Výsledky jsou v následující tabulce:

δ	$k_{\mu\delta}$		
	3 km/h	6 km/h	9 km/h
0,3	-0,0060	-0,0040	-0,0030
0,5	-0,0075	-0,0070	-0,0045
0,7	-0,0110	-0,0095	-0,065

Výsledky opět potvrzují již konstatovaný fakt o podstatném vlivu relativní amplitudy δ na pokles μ_{max} a na stabilizační účinek rychlosti jízdy V . Z tabulky lze přímo stanovit regresní vyjádření negativního účinku δ na směrnicí $k_{\mu\delta}$, např. pro $V = konst = 6 \text{ km/h}$, vzorcem

$$k_{\mu\delta} = 9,3 \cdot 10^{-6} - 0,0137 \cdot \delta \doteq -0,0137 \cdot \delta, \quad (r_{xy} = 0,999).$$

Obdobně se dá vyjádřit pozitivní vliv rychlosti V , zde v intervalu $V = 3 \div 9 \text{ km/h}$ s možností určité extrapolace, např. pro $\delta = konst = 0,5$ vzorcem

$$k_{\mu V} = -0,01 + 5 \cdot 10^{-4} \cdot V, \quad (r_{xy} = 0,933).$$

Výsledky by bylo možno zpracovat i víceparametricky, např. analýzou rozptylu při třídění podle dvou faktorů, což by se osvědčilo při dostatečném množství vstupních materiálů. Zde však bylo účelem upozornit na hlavní vlivy a jejich účinky.

Proměnné nápravové zatížení, způsobené např. nerovnostmi koleje, způsobuje tedy právě v rozjezdové fázi výrazné snížení součinitele adheze, doprovázené zvýšením relativního skluzu s resp. skluzové rychlosti w . Této skutečnosti by měla odpovídat reakce protiskluzových zařízení. Zkoušky na modelovém zkušebním zařízení ukázaly, že nelze jednoznačně nastavit prahové hodnoty w resp. s měřících čidel, protože za velmi zhoršených dynamických podmínek bychom nevyužili schopnost efektivní větve deformované adhezní charakteristiky. Z tohoto důvodu se jeví vhodnější využít pro protiskluzová zařízení efekt změny torzní frekvence soustavy dvojkolí - pohon - trakční motor, při přechodu z pevné vazby do vazby volné.

Poznámka : Příspěvek vznikl za podpory grantu GAČR 101/98/0246 - Optimalizace a součinnost brzdových systémů kolejových vozidel

Lektoroval: Doc. Ing. Karel Sellner, CSc.

Předloženo v lednu 1999.

Literatura

- [1] Čáp J. : Možnosti podobnostní metody studia adheze. Scientific Papers of the University of Pardubice, Series B, 3 (1997), s. 105-111.

Resumé

PROMĚNNÁ NÁPRAVOVÁ SÍLA A TENDENCE DEFORMACÍ ADHEZNÍCH CHARAKTERISTIK

Jaroslav ČÁP

Příspěvek podává výsledky získané na modelovém zkušebním zařízení pro fázi rozjezdu kolejového vozidla. Důsledkem je výrazné snížení součinitele adheze, doprovázené zvýšením hodnoty relativních skluzů resp. skluzové rychlosti. Tento efekt musí být respektován při návrhu protiskluzových zařízení, aby i za této situace mohla být využita efektivní větev adhezní charakteristiky.

Summary

THE CHANGEABLE AXLE FORCE AND TENDENCY OF ADHESION CHARACTERISTICS DEFORMATIONS

Jaroslav ČÁP

The paper presents results obtained by means of model testing equipment for the period when a railway vehicle is set in motion. The consequence is shown in considerable reduction of adhesion coefficient, attended with increase of relative slips value and slip velocity, respectively. The effect must be respected in case of designing the anti-skid device to take advantage of the effective branch of adhesion characteristic in such situation, too.

Zusammenfassung

WECHSELHAFTE ACHSLAST UND DEFORMATIONSTENDENZEN DER ADHÄSIONSCHRAKTERISTIK

Jaroslav ČÁP

Der Beitrag erbringt neue auf dem Modelleprüfstand gewonnene Ergebnisse bei der Schienenfahrzeuganfahrt. Die Konsequenz ist eine bedeutende Verringerung des Adhäsionskoeffizienten, begleitet von der Erhöhung des relativen Schlupfes bzw. der relativen Schlupfgeschwindigkeit. Dieses Effekt muß beim Entwurf einer Antischlupfeinrichtung respektiert werden, damit auch unter diesen diesen Umständen der effektive Zweig der Adhäsionscharakteristik ausgenutzt werden kann.

