

SCIENTIFIC PAPERS
OF THE UNIVERSITY OF PARDUBICE

Series B

The Jan Perner Transport Faculty

4 (1998)

**METODIKA KVAZISTATICKÉHO VYŠETŘOVÁNÍ BEZPEČNOSTI
PROTI VYKOLEJENÍ VOZIDEL PŘI JÍZDĚ
VZESTUPNICÍ OBLOUKU VÝPOČTEM**

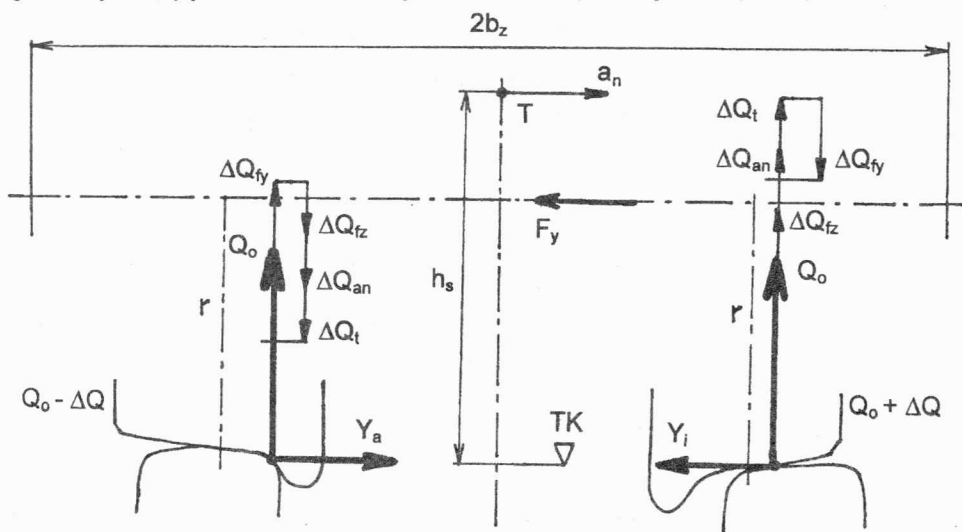
Jiří IZER, Michael LATA

Katedra dopravních prostředků

ÚVOD

Vzestupnice oblouku představuje vzhledem k jízdni dráze zborcení, jehož velikost je obecně dána strmostí vzestupnice na uvažované délce (bázi). Jestliže se vozidlo do tohoto zborcení dostane, vzniká stav, při němž dotykové body všech kol nevytváří jednu myšlenou rovinu. U kola, které se nachází pod rovinou zbývajících třech kol, dochází k odlehčení (*Obr. 1, Obr. 2*) a tím i k nepříznivější hodnotě poměru sil Y/Q , respektive snížení hodnoty bezpečnosti proti vykolejení (BPV). Z praktického hlediska je nutno si uvědomit, že k uvedené nepříznivé situaci dochází na strmých vzestupnicích, při výjezdu vozidla z oblouku, na nabíhajícím kole 1. dojkolí. Na odlehčení kola má však vliv řada dalších parametrů. Jejich souvislost a výpočet samotný je předmětem naznačeného řešení. Potřeba zjistit míru BPV bez nákladných jízdních zkoušek u vozidel uváděných do provozu vyústila do výsledku řešení výboru ERRI vydáním zprávy ERRI B55/Rp8 (z roku 1983) [1].

Základní postup řešení pro konkrétní vozidlo na konkrétní vzesupnici lze odvodit interpretací příslušných kapitol zmíněné zprávy. I když řada zejména empirických závěrů této zprávy se týká výhradně pojezdů nákladních vozů, které byly pro tento účel podrobeny rozsáhlým měřením, obecná metodika je transformovatelná a použitelná na jakékoliv vozidlo za předpokladu, že jsou dány jednoznačně jeho parametry (rozměrové, tuhostní) a že lze získat hodnoty vodicích sil v konkrétním oblouku. Na přesnosti těchto hodnot totiž závisí přesnost výpočtu BPV. Náročné je zejména určení vodicích sil. Poměrně seriózní určení vodicích sil pro nejběžnější typy nákladních podvozků je možné z empirických vzorců, uvedených ve zprávě ERRI B55/Rp8. V případě osobních vozů nebo hnacích vozidel přichází v úvahu velmi nákladné měření, nebo náročné simulační výpočty (jehož výsledky jsou konfrontovány s měřením – pokud je k dispozici).



Obr.1 Postavení vozidla při výjezdu z oblouku na vzesupnici (strmosti 1:n)

PŘEDPOKLADY VÝPOČTU

Aby se kvazistatické výpočtové řešení pro osobní vozy, motorové vozy a lokomotivy co nejvíce přiblížilo mezní situaci, při níž může dojít k vykolejení, je nutno počítat s co nejnepříznivějšími podmínkami, které mohou reálně nastat:

- Vozidlo se pohybuje velmi malou rychlostí (záporná hodnota nevyrovnaného zrychlení a_n – působí do středu koleje – vzniklý moment odlehčuje nabíhající kolo).
- Kolové síly na tomtéž dvojkolí vykazují na přímé koleji provozní odchylku (ΔQ_{fz}) větší než je dovolená hodnota 8%, např. 15% (v případě jednoduché regulace vzduchového vypružení až 30% zjištěných).

- Skříň i podvozek se chovají jako tuhá tělesa (ve skutečnosti mají svou torzní poddajnost, což částečně napomáhá průjezdu zborcenou kolejí).
- Vozidlo se pohybuje prázdné – kolové síly Q jsou minimální (v případě vozů).
- Zpráva ERII B55/Rp8 uvádí hodnoty tzv. mezního zkušební zkroucení vozidla $g^+(\%)$ pro rozvor podvozku a $g^*(\%)$ pro vzdálenost otočných čepů vozidla. Tyto hodnoty jsou počítány na základě empirických vzorců na základě velkého počtu měření na evropských tratích. Za podmínek takového zkroucení vozidla, vyvolaného zborcením koleje pod ním, může se na nabíhající kole dosáhnout meze vykolejení, jestliže se u něho současně dosáhne všech již výše uvedených okolností.

$$g^+ = 7 - \frac{5}{2a^+} \dots\dots\dots \text{zkušební zkroucení podvozku} \quad [\%]$$

$$a/ \quad g^* = \frac{15}{2a^*} + 2 \dots\dots\dots \text{zkušební zkroucení vozidla} \quad [\%]$$

$$b/ \quad g_{(1,2)} = 1,2 \cdot g \dots\dots\dots \text{skutečné zkroucení vozidla} \quad [\%]$$

$$g \dots\dots\dots \text{jmenovitá strmost vzestupnice} \quad [\%]$$

$$2a^+ \dots\dots\dots \text{rozvor podvozku}$$

$$2a^* \dots\dots\dots \text{rozvor vozidla.}$$

V případě velmi strmých vzestupnic dochází však k situaci, kdy je již zkušební zkroucení vozidla menší, než skutečná jmenovitá strmost vzestupnice. Obecně lze říci, že v praxi se jedná konkrétně o ojedinělé případy na regionálních tratích, či vlečkách. Tento vliv se projeví na účinné délce rozvoru vozidla. Proto se ve výpočtech nahradí g^* (vztah a/) hodnotou skutečné strmosti konkrétní vzestupnice $g_{(1,2)}$ (vztah b/), navíc navýšenou o předpokládanou provozní výškovou odchylku kolejnicových pásů 20%, což vytváří pro konkrétní výpočet nepříznivější situaci.

VLASTNÍ ŘEŠENÍ

1. Mezní stav vozidla – mez vykolejení:

$$\lim \Delta Q = \lim \Delta q \cdot Q_0$$

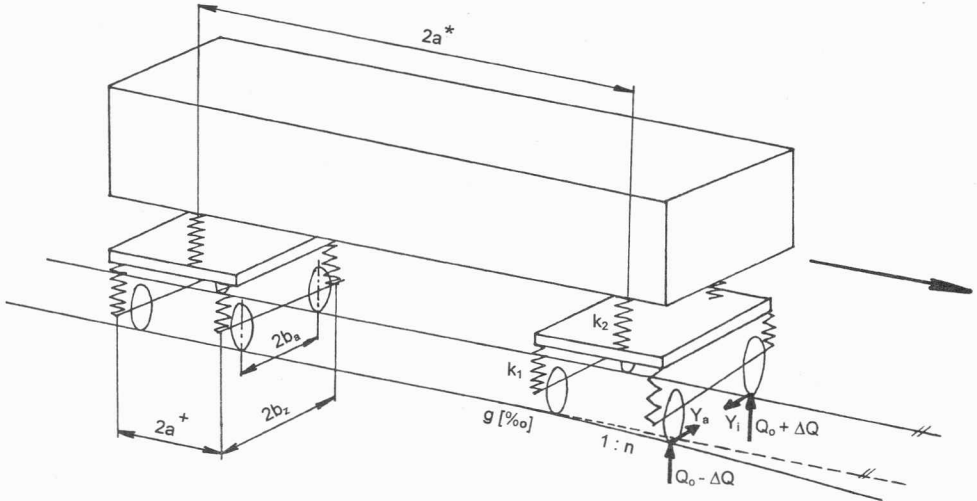
$$\lim \Delta q = \frac{1.2 - \frac{Y_a}{Q_0}}{1.2} \dots\dots\dots \text{mezní poměrná změna kol. síly}$$

$$Q_0 \dots\dots\dots \text{jmenovitá kolová síla}$$

Y_a vodící síla na nabíhající kole.

2. **Mezní hodnota odlehčení kola zborcením koleje** - při této hodnotě se vozidlo dostává za nejnepříznivějších podmínek na mez vykolejení a je při ní dosaženo mezní změny kolové síly:

$$\lim \Delta Q_t = \lim \Delta Q - \Delta Q_{fz} - \Delta Q_{an} - \Delta Q_{fy}$$



Obr. 2 Skutečná velikost odlehčení nabíhajícího kola

Přítom jednotlivá dílčí odlehčení kola lze vyjádřit:

- Odchyka kolové síly (odlehčení), zjistitelná na kolové váze, která vzniká tolerancemi tuhosti a rozměrů vypružení, nerovinnostmi rámců podvozku a skříně, hysterezi ve vypružení a v konstrukci:

$$\Delta Q_{fz} = \Delta q \cdot Q$$

Δq_o [%] poměrná provozní odchyka.

- Přetížení nabíhajícího kola účinkem nevyrovnaného zrychlení (pokud a_n působí do středu oblouku, je přetížení záporné):

$$\Delta Q_{an} = \frac{(m_v - n \cdot m_d) \cdot a_n \cdot (h_s - r)}{n \cdot 2b_a}$$

n počet dvojkolí vozidla

m_v hmotnost vozidla

m_d hmotnost dvojkolí

h_s výška těžiště

r poloměr kola

$2b_a$ vzdálenost styčných kružnic

$$a_n = \frac{v^2}{R} - 9.81 \frac{p}{2b_a} \dots\dots\dots \text{příčné nevyrovnané zrychlení}$$

v rychlost jízdy

R poloměr oblouku koleje

p jmenovité převýšení koleje.

- Přetížení vnějšího kola účinkem příčné síly F_y :

$$\Delta Q_{fy} = F_y \cdot \frac{r}{2b_a}$$

F_y příčná síla v ose první nápravy, vytvářející klopný moment, způsobující přetížení nabíhajícího kola

$$F_y = Y_a - Y_i$$

Y_a vodící síla na nabíhajícím (vnějším) kole

Y_i vodící síla na vnitřním kole.

3. Celková skutečná změna kolové síly pod nabíhajícím kolem vyvolaná mezním zkroucením vozidla

$$\Delta Q_t = \Delta Q_t^+ + \Delta Q_t^*$$

- Odlehčení vnějšího kola zkušebním zkroucením podvozku:

$$\Delta Q_t^+ = c_{ta}^+ \cdot g^+$$

c_{ta}^+ torzní tuhost podvozku zohledňující pouze poddajnost vypružení u nápravových ložisek určí se ze vztahu:

$$\frac{1}{c_{ta}^+} = \frac{4000}{2a^+} \cdot \frac{1}{k_1} \cdot \left(\frac{b_a}{b_z} \right)^2 = \frac{g^+}{\Delta Q_t^+}$$

$2b_z$ příčná vzdálenost vypružení

k_1 svislá tuhost primárního vypružení u nápravového ložiska, v případě potřeby (u hnacích vozidel) přepočítaná na vzdálenost $2b_z$.

- Odlehčení vnějšího kola zkušebním zkroucením na vzdálenosti otočných čepů:

$$a/ \Delta Q_t^* = c_{ta}^* \cdot g^*$$

$$\text{nebo: } b/ \Delta Q_t^* = c_{ta}^* \cdot g_{(1,2)}^*$$

c_{ta}^* torzní tuhost vozidla c_{ta}^* vztažená na vzdálenost otočných čepů a zohledňující pouze poddajnost obou soustav vypružení vozidla, se určí ze vztahu:

$$a/ \frac{1}{c_{ta}^*} = \frac{8000}{2a^*} \left[\frac{1}{k_2} + \frac{1}{2k_1} \right] \cdot \left(\frac{b_a}{b_z} \right)^2 = \frac{g^*}{\Delta Q_t^*}$$

$$b/ \frac{1}{c_{ta}^*} = \frac{8000}{2a^*} \left[\frac{1}{k_2} + \frac{1}{2k_1} \right] \cdot \left(\frac{b_a}{b_z} \right)^2 = \frac{g_{(1,2)}}{\Delta Q_t^*}$$

k_2svislá tuhost sekundárního vypružení, na jedné straně podvozku, přepočtená na vzdálenost $2b_z$.

4. **Bezpečnost proti vykolejení** je vyjádřena poměrem mezní a skutečné změny kolové síly při zkušebním zkroucení vozidla:

$$BPV = \frac{\lim \Delta Q_t}{\Delta Q_t}$$

Bezpečnost proti vykolejení lze též vyjádřit poměrem Y/Q :

$$\lim(Y/Q): Y_a / (Q_o - \Delta Q),$$

$$\text{kde: } \Delta Q = \Delta Q_{fz} + \Delta Q_{an} - \Delta Q_{fy} + \Delta Q_t.$$

Uvedený postup je výhodné algoritmovat ve vhodném programovém prostředí na PC. Pro tento účel se ukázalo postačující vytvořit model v MS Excelu, ukázka je uvedena v Tab. 1.

ZÁVĚR

V tomto příspěvku je uvedena metodika hodnocení bezpečnosti proti vykolejení. Vychází převážně z interpretace zprávy ERRI B55/Rp8. Kvazistatický charakter výpočtu se dopouští i jistých nepřesností, které jsou dány zejména těmito okolnostmi:

- Je malá pravděpodobnost, že by se na účinné délce (2 m) vyskytly současně maximální (mezní) hodnoty g^+ a g^* , což je zmíněno i ve zprávě ERRI B55/Rp8.
- Skříň i podvozek vozidla nejsou ve skutečnosti tuhá tělesa, nýbrž jsou schopny částečně svou torzní poddajností účinky propadu mírnit.
- Simulační výpočty, ze kterých byly v tomto případě určovány velikosti vodících sil, uvažují maximální součinitel adheze (to je díky např. mazání okolků v praxi dosažitelné málokdy).

Tab. 1 Ukázka konkrétního výpočtu pomocí modelu v MS Excelu

Vozidlo ř.	AB	Tab.1.1	
Trať. Úsek: Hanušovice – Mikulovice			
VSTUPNÍ HODNOTY			
sklon vzestupnice	1 : n		1:333
jmenovitá strmost	g	[‰]	3,003
poloměr oblouku	R	[m]	191
převýšení	p	[mm]	45
rychlost jízdy	v	[m/s]	3
výška těžiště	hs	[m]	1,9
hmotnost vozidla	mv	[kg]	38000
vzdál. středů ložisek	2bz+	[m]	2
rozvor podvozku	2a+	[m]	2,5
vzdál. otoč. čepů	2a*	[m]	17,2
zkušeb.zkrouc.vozidla (B55)	g*	[‰]	2,872
vnucené zkrouc. vozidla	g(1,2)	[‰]	3,604
mezni zkrouc. podvoz. (B55)	g+	[‰]	5,000
poloměr kola	r	[m]	0,475
kolová síla (prázdný)	Qo	[kN]	47,0
poměrná odchylka kolové síly	dqo	[1]	0,1
hmotnost dvojkolí	md	[kg]	1050
odpor proti natáč. podv.	M	[kN.m]	
1.vypružení / ložisko	k1	[kN/m]	1185
2.vypružení / 1.bod	k2	[kN/m]	610
příčná vzdál. 2.vypruž.	2bz*	[m]	2
VYPOČTENÉ HODNOTY			
vnější vodící síla	Ya	[kN]	35,0
vnitřní vodící síla	Yi	[kN]	-14,0
nevyrov. zrychlení	an	[m/s ²]	-0,247
příčná síla	Fy	[kN]	21,0
torzní tuhost skříně	cta*	[kN/‰]	1,854
torzní tuhost podvozku	cta+	[kN/‰]	1,317
VÝSTUPNÍ HODNOTY			
odlehčení nabíhajícího kola:			
limitní hodnota	limdQ	[kN]	17,833
od nevyrov. zrychlení	dQan	[kN]	1,984
od odchylky kol. síly	dQfz	[kN]	4,700
od příčné síly	dQfy	[kN]	-6,650
mezni hodnota	limdQt	[kN]	17,799
od zkroucení podvozku	dQt+	[kN]	6,583
od zkroucení skříně	dQt*	[kN]	6,682
celk. změna ze zborcení	dQt	[kN]	13,265
Bezpečnost proti vykolejení	limdQt/dQt		1,342

- Odhadované hodnoty odchylek kolových sil (15%, resp. 30%) jsou spíše nadsazeny, protože při vážení vozidel po opravě se připouští u vozů odchylka 8% a hnacích vozidel dokonce 4%.
- V praxi je velmi malý počet případů, že by se prázdné vozidlo pohybovalo na inkriminovaném úseku téměř nulovou rychlostí, a navíc by spolupůsobily všechny výše uvedené mezni podmínky.

To však není ke škodě, naopak. Uvedenými mírně pesimistickými odhady je vytvořena jistá (i když relativně malá) bezpečnostní rezerva ve vypočtených hodnotách BPV. Vypracovaná metodika se plně osvědčila i při řešení reálných problémů v praxi [2]. Svou logičností a relativní jednoduchostí je rovněž vhodná jako doplněk výuky odborných předmětů, včetně již zmíněné programové aplikace.

Lektoroval: Dr. Ing. Juraj Gerlici

Předloženo v lednu 1999.

Literatura

- [1] Zpráva ERRI B55/Rp8, 1983.
- [2] Izer J., Lata M.: Mezní hodnoty zborcení koleje pro hnací vozidla a osobní vozy na tratích ČD s projektovaným sklonem vzestupnic větším než 1:400. Výzkumná zpráva č.ASI 15/98. Česká Třebová, říjen 1998.

Resumé

METODIKA KVAZISTATICKÉHO VYŠETŘOVÁNÍ BEZPEČNOSTI PROTI VYKOLEJENÍ VOZIDEL PŘI JÍZDĚ VZESTUPNICÍ OBLUKU VÝPOČTEM

Jiří IZER, Michael LATA

Kvazistatický výpočet odlehčení nabíhajícího kola a bezpečnosti proti vykolejení při jízdě vzestupnicí oblouku podle ERRI B55/Rp8, aplikovaný na osobní vozy, motorové vozy a lokomotivy.

Summary

THE KVAZISTATIC INVESTIGATION METHODOLOGY OF SECURITY OF VEHICLE DERAILMENT NEAR RUNNING AT GRADIENT DUE TO SUPERELEVATION OF CURVE AS SOLUTION

Jiří IZER, Michael LATA

The kvazistatic solution of climb-on wheel lightening and of vehicle derailment security near running at gradient due to superelevation of curve according to ERRI B55/Rp8, applicated at passanger coaches, suburban railcars and locomotive.

Zusammenfassung

QUAZISTATISCHE BERECHNUNG DER ENTGLEISUNGS - SICHERHEIT BEI DER FAHRT DURCH DIE GLEISVERWINDUNG IN EINEM ÜBERGANGSBOGEN

Jiří IZER, Michael LATA

Quazistatische Berechnung der Entlastung des anlaufenden Rades und der Entgleisungs - sicherheit bei der Fahrt durch die Gleisverwindung in einem Übergangsbogen lauf ERRI B55/Rp8 angewandt an die Personen - und Triebwagen und Lokomotiven.

Jiří Izer, Michael Lata: