

CONTINUOUS MEASUREMENT OF TRACK STIFFNESS USING A ROLLING LOAD

A. Vymětal*, J. Turek*

Summary: *The paper contains the preliminary results of the grant project "Non-homogeneities of railway track as an aspect of track quality". The special device for measuring the vertical track stiffness was designed and built by the modification of an older tamping machine. The description of the measuring in the track to be carried out by this device in 2000-2002 is given in the form of graphs and tables. One chapter is devoted to the numerical method for track stiffness computation. This method was applied on the measured data of the rail deflection under a moving load. The criterion for track quality assessment was offered on the basis of test results.*

1. Úvod

V současné době existují rozsáhlé znalosti o geometrii koleje, ale velmi malé o její svislé tuhosti. Změny tuhosti koleje způsobují přídavné deformace koleje, které se skládají s geometrickými nerovnostmi a ovlivňují bezpečnost jízdy vozidel. Řada výpočetních modelů, které popisují chování a jízdní vlastnosti vozidel, potřebuje jako vstupní údaje jak geometrii koleje tak tuhost koleje a vzájemné vztahy mezi těmito dvěma veličeni.

Vzhledem k aktuálnost problematiky byl Grantovou agenturou České republiky udělen projekt s názvem „Nehomogenity železniční trati jako aspekt hodnocení její kvality“, jehož hlavním řešitelem je ČVUT Praha, Katedra železničních staveb a spoluřešitelem je Komerční železniční výzkum spol. s r.o. Praha (KŽV).

Při řešení grantového projektu bylo firmou KŽV Praha vyvinuto zařízení na kontinuální měření tuhosti tratě a software provádějící matematický přepočtení naměřených hodnot svislé deformace koleje na průběh svislé tuhosti koleje separátně pro oba kolejnicové pásy. Tuhost koleje se určuje z rozdílu svislé deformace tratě mezi stavem bez zatížení a při zatížení pod kontinuálně se pohybující známou svislou silou. V letech 2000 až 2002 bylo s výše uvedeným zařízením změřeno několik ucelených úseků na tratích různého významu.

* Ing. Antonín Vymětal, Ing. Josef Turek, CSc.: Komerční železniční výzkum spol. s r.o., U kapličky 1199; 16500 Praha 6; tel./fax: +420220920553; e-mail: avymetal.kzv@volny.cz, jturek.kzv@volny.cz

2. Stroj pro kontinuální měření tuhosti koleje (stroj SKMT)

Zařízení SKMT (viz. Obr. 1). je schopno splnit v reálném čase dvě základní funkce: kontinuální zatěžování koleje a kontinuální měření výškových deformací koleje. Zařízení se skládá z upravené automatické strojní podbíječky, ze dvou čtyřdílných nosníků uložených na pěti speciálních vozících a z měřicího vozíku KRAB. Všechny tři části jsou spřáhnuté a pohybují se po koleji společně.

Potřebná svislá síla je vyvozována na oba kolejnicové pásy v místě původního zdvihacího mechanismu podbíječky. Na hlavu kolejnice je přenášena rolnami, které jsou přitlačovány k temenům kolejnic hydraulickými válci. Výšková poloha prostředního vozíku umístěného v těsné blízkosti zatěžovacího zařízení podbíječky je určována relativně k poloze krajních vozíků ze změny vzájemného úhlového natočení soustavy čtyř nosníků. Ujetá dráha je měřena inkrementálním čidlem umístěným na vozíku KRAB. Zpracování a ukládání signálů snímačů se provádí měřicím elektronickým systémem vozíku KRAB vybaveným palubním počítačem Husky FS3.

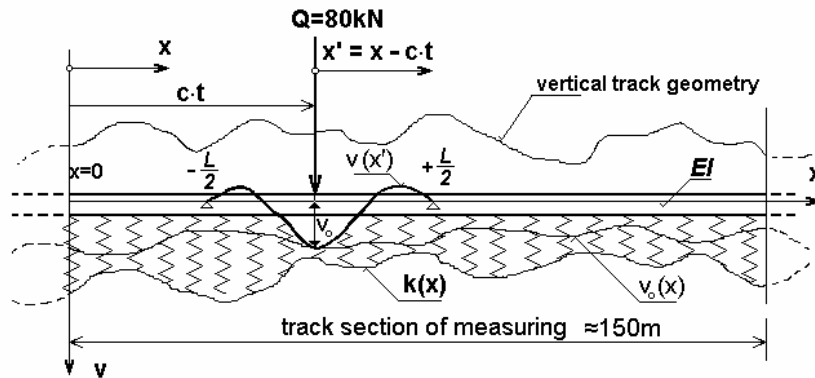


Obrázek 1 Stroj SKMT

Měření tuhosti tratě se provádí dvěma průjezdy přes zkoumaný úsek s typickou délkou několik set metrů. Při první jízdě je upravené přitlakové zařízení podbíječky vypnuto. Při druhé jízdě toto zařízení vyvozuje svislou sílu o velikosti 80 kN na každý kolejnicový pás. Hodnota tuhosti tratě je určena z rozdílné výškové polohy kolejnicových pásů mezi dvěma výše uvedenými zatěžovacími stavy.

3. Výpočet tuhosti kolejnicových podpor

Zvolme pevný souřadný systém tak, že počátek délkové souřadnice x položíme do začátku měřeného úseku. Konstantní zatěžovací síla Q se pohybuje rovnoměrnou malou rychlostí c .



Obrázek 2 Nosník na pružném podkladě s nekonstantní tuhostí

Do působíště síly Q položíme počátek pomocného souřadného systému x' , který se pohybuje společně se silou Q :

$$x' = x - c.t \quad (1)$$

s uvážením faktu, že rychlost pohybu zatěžovací síly je velmi malá, je možné zanedbat setrvačné síly a pro průhyb kolejnice v platí v pevném souřadném systému rovnice s okrajovými podmínkami:

$$EJ v''''(x,t) + k(x).v(x,t) = Q.\delta(x - c.t) \quad (2)$$

$$v(\pm\infty) = v'(\pm\infty) = v''(\pm\infty) = v'''(\pm\infty) = 0$$

kde EJ je ohybová tuhost kolejnicového pásu

$k > 0$, je tuhost podloží kolejnicového pásu

Měřicí zařízení měří hodnotu průhybu kolejnice v_0 v místě pohybující se zatěžovací síly $x'=0$:

$$v_0(x,t) = v_0(x'+c.t,t) = v_0(c.t)_{x'=0} = v_0(x) \quad (3)$$

Měřená hodnota průhybu kolejnice $v_0(x)$ v místě síly Q je vstupní známá veličina do výpočtu, kde hledáme neznámý průběh tuhosti $k(x)$. Rovnicemi (1,2 a 3) je tento problém formulován. Vzhledem k tomu, že rovnice (2) je psána pro neznámý průhyb a ne pro tuhost, jde o problém inverzní.

Řešení přímého problému

Přejdeme do pohyblivého souřadného systému, ve kterém je pokles kolejnice popsán rovnicí s okrajovými podmínkami:

$$EJ v''''(x') + k(x').v(x') = Q.\delta(x') \quad (4)$$

$$v(\pm\infty) = v'(\pm\infty) = v''(\pm\infty) = v'''(\pm\infty) = 0$$

protože řešení (4) pro obecnou tuhost podloží k není známo v uzavřeném tvaru, použijeme některou z variačních metod. Pro tento účel přeformulujeme problém (4) z nekonečného intervalu $(-\infty, \infty)$ na konečný $\langle 0, L \rangle$:

$$EJ v''''(x') + k(x') \cdot v(x') = Q \cdot \delta(x' - \frac{L}{2})$$

$$v(0) = v(L) = v''(0) = v''(L) = 0$$
(5)

řešení v hledáme ve tvaru:

$$v(x') = \sum_{i=1}^{\infty} \alpha_i \varphi_i = \sum_{i=1}^{\infty} \alpha_i \sin \frac{i\pi x'}{L}$$
(6)

Zvolíme-li Ritzovu metodu, platí pro neznámé koeficienty α_i soustava lineárních rovnic, kde prvky matice soustavy

$$\mathbf{A}_{i,j} \alpha_i = \mathbf{p} s_i$$
(7)

mají tvar:

$$A_{i,j} = EJ \int_0^L \varphi_i'' \cdot \varphi_j'' + \int_0^L k(x') \cdot \varphi_i \cdot \varphi_j dx'$$
(7a)

pravá strana soustavy má tvar:

$$p s_i = Q \cdot \sin \frac{i\pi}{2}$$
(8)

Iterační řešení inverzního problému

Protože ve skutečnosti známe změřený průhyb $v_0(x)$ a hledáme tuhost $k(x)$, která vyhovuje rovnici (4) stojíme před inverzní úlohou, kterou lze řešit iteračním postupem:

Pro každé místo koleje x předpokládáme izolovaně, že tuhost k je v tomto místě a také v dostatečném okolí konstantní. Potom platí mezi deformací koleje v pod silou Q a tuhostí k jednoduchý vztah vycházející z řešení nekonečného nosníku:

$$k = \sqrt[3]{\frac{1}{64EJ} \left(\frac{Q}{v}\right)^4}$$
(9)

vztah (9) použijeme pro výpočet první iterace průběhu tuhosti $k_0(x)$:

$$k_0(x) = \sqrt[3]{\frac{1}{64EJ} \left(\frac{Q}{v_0(x)}\right)^4}$$
(10)

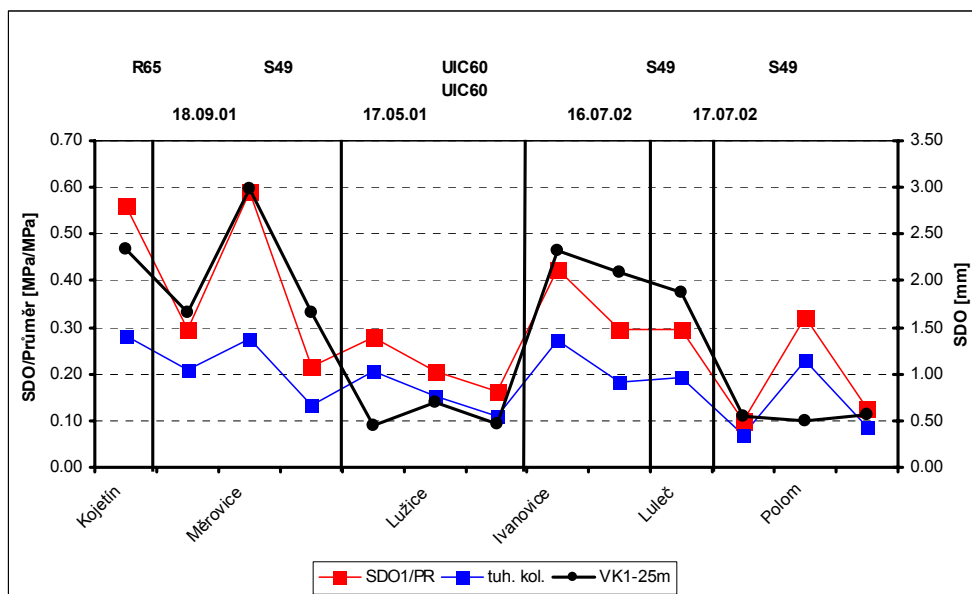
Pomocí rovnic (6), (7), (7a) a (8) vypočítáme v každém místě odpovídající hodnotu průhybu koleje $v_1(x)$. Pro další iteraci tuhosti $k_n(x)$ byl empiricky nalezen vhodný předpis ve tvaru:

$$k_n(x) = k_{n-1}(x) \sqrt[3]{\left(\frac{v_n(x)}{v_0(x)}\right)^5}$$
(11)

Iterace byly prováděny dokud vzdálenost změřeného průhybu $v_0(x)$ a n -té iterace průhybu $v_n(x)$ nebyla dostatečně malá. V praxi se za vzdálenost funkcí vzala směrodatná odchylka jejich rozdílů, jejíž hraniční hodnota byla 0.001mm. Obvykle takto stanovené chyby řešení bylo dosaženo po 4-5ti iteracích. Výjimku tvoří případy, kdy změřený průhyb vykazuje krátkovlnné změny, nebo je velmi malý (0.2mm). To může být reálné, uvážíme-li, že pražec může být podepřen velmi tuze bodově a nesymetricky v prostoru mezi kolejnicemi. V takovém případě může být reálný i záporný průhyb (kolejnice se v místě zatížení proti němu zvedá) a je způsoben prostorovostí konstrukce koleje. Takový případ byl naměřen pouze v jednom místě jednoho z úseků v Měrovicích.

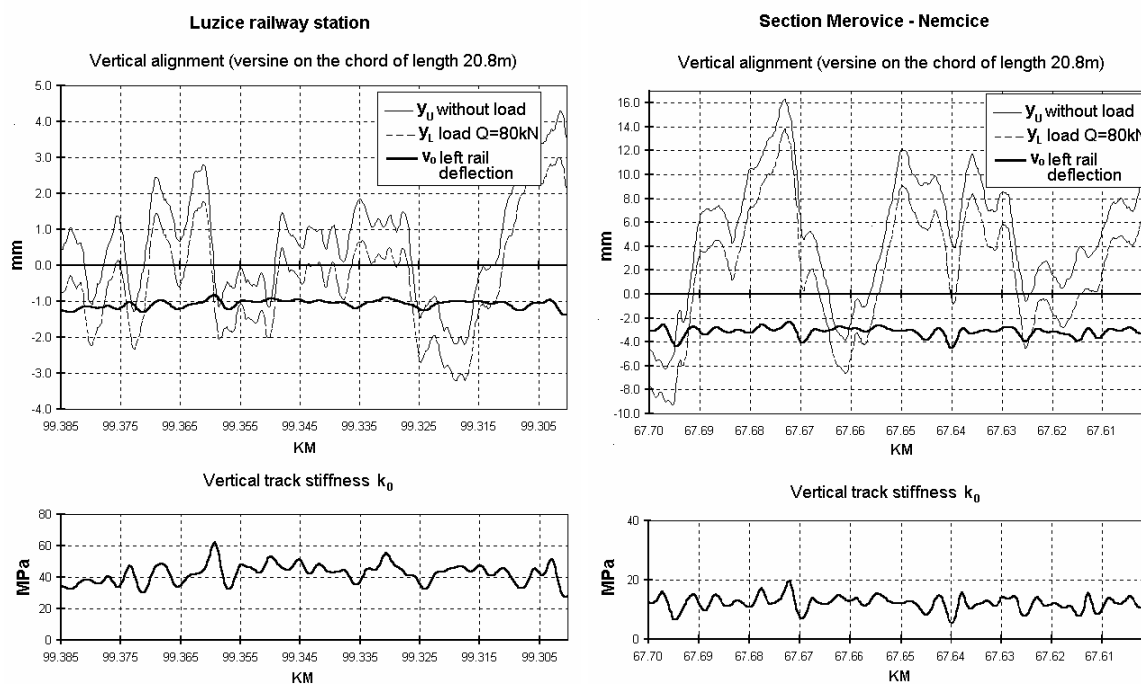
4. Měření v koleji

S měřicím zařízením SKMT bylo provedeno měření v úsecích s různou kvalitou geometrické polohy koleje a různým provozním zatížením. Na Obrázku 3 jsou uvedeny všechny měřené lokality. Body popsané **SDO1/PR** jsou poměry sm. odchylky a průměru tuhosti podloží. Body popsané **tuh. kol.** jsou sm. odchylky tuhosti kolejnicového pásu a body **VK1-25m** jsou sm. odchylky svislé geometrie koleje ve vlnovém pásmu 1-25m.



Obrázek 3 Kvalita svislé tuhosti a geometrie koleje na měřených úsecích

Na následujících obrázcích jsou uvedeny příklady grafického zpracování výsledků měření ze dvou úseků koleje s rozdílným stavem geometrie.



Z každého úseku koleje byla vybrána jedna 100 m část jednoho kolejnicového pásu.

5 Průměrné hodnoty a směrodatné odchylky parametrů koleje

V následujících TAB. 1-3 jsou shrnuty průměrné hodnoty a směrodatné odchylky měřených a vypočítaných parametrů koleje v jednotlivých měřených úsecích zvlášť pro levý a pravý kolejnicový pás.

TAB. 1. Úsek Kojetín – Tovačov

Kolejnice	Počítaná veličina	Parametry koleje			
		GPK bez zatížení	GPK při zatížení 80 kN	Výšková deformace koleje	Svislá tuhost koleje
Levá	Průměr	5,61	3,46	- 2,15	19,44
	SDO	7,134	7,203	0,671	13,584
Pravá	Průměr	1,05	- 1,36	- 2,41	16,00
	SDO	7,601	7,633	0,774	7,932

TAB. 2. Úsek žst. Lužice

Kolejnice	Počítaná veličina	Parametry koleje			
		GPK bez zatížení	GPK při zatížení 80 kN	Výšková deformace koleje	Svislá tuhost koleje
Levá	Průměr	0,74	- 0,10	- 0,842	63,23
	SDO	1,778	1,771	0,138	13,898
Pravá	Průměr	0,88	- 0,08	- 0,952	53,70
	SDO	1,613	1,605	0,121	9,490

TAB. 3. Úsek Měrovice - Němčice

Kolejnice	Počítaná veličina	Parametry koleje			
		GPK bez zatížení	GPK při zatížení 80 kN	Výšková deformace koleje	Svislá tuhost koleje
Levá	Průměr	7,33	4,48	- 2,80	15,60
	SDO	5,787	6,052	0,763	7,684
Pravá	Průměr	4,22	0,83	- 3,40	13,35
	SDO	6,078	6,201	0,895	4,180

Vlastní hodnota průměru GPK bez zatížení a GPK při zatížení nemá význam, záleží na aktuálním nastavení snímačů. Významný je pouze rozdíl těchto dvou průměrů, který by měl odpovídat průměru velikosti výškové deformace koleje.

Hodnota svislé tuhosti koleje v úseku v žst. Lužice je poměrně vysoká, kdežto hodnoty svislé tuhosti koleje na úsecích Měrovice – Němčice a Kojetín – Tovačov jsou nepoměrně nižší. Hlavní příčinou tak velkého rozdílu je z největší pravděpodobnosti postupné dotvarování šterkového lože pod spodní plochou pražce v místě hlav pražců po delší době provozu (kolej v žst. Lužice byla nově zřízená včetně spodku, velmi málo pojížděná v porovnání s podstatně staršími kolejemi více provozně zatíženými na dalších dvou měřených úsecích).

Průměrná hodnota tuhosti koleje ve svislém směru v žst. Lužice se zdá příliš vysoká. Je to zřejmě důsledek toho, že na nově zřízené koleji včetně spodku, s kvalitním a dobře zhutněným šterkovým ložem bylo použito vertikálně poměrně tuhé upevnění. Tento stav by mohl při intenzivnějším provozu mít za následek relativně rychlé zhoršení stavu geometrické polohy koleje.

Směrodatné odchylky obecně charakterizují proměnlivost dané veličiny. V případě geometrické polohy koleje (GPK) e směrodatnou odchylkou tradičně hodnotí její kvalita. Geometrická kvalita koleje v žst. Lužice je výrazně lepší než na úsecích Měrovice – Němčice a Kojetín – Tovačov, které jsou vzájemně srovnatelné.

Hodnocení variability tuhosti tratě ve svislém směru je vhodné založit na poměru směrodatné odchylky ku střední hodnotě (SDO/průměr). Tento parametr je na měřeném úseku v žst. Lužice 0,20, v úseku Měrovice – Němčice 0,41 a v úseku Kojetín – Přerov 0,61. Tyto hodnoty odpovídají významu a udržovacímu stavu měřených úseků. Doporučujeme parametr SDO/průměr používat pro hodnocení kvality tuhosti tratě ve svislém směru.

3. Základní výsledky

Rozbor dosud provedených měření opravňuje dva základní závěry. Tvarově se signál tuhosti podloží kolejnicových pásů liší od signálu svislé geometrie kolejnicových pásů a tyto signály jsou nekorelované. Vzájemný korelační koeficient je menší než 0.1. Statisticky jde o dva nezávislé signály.

Druhý závěr je, že směrodatné odchylky signálu tuhosti a geometrie naopak závislé jsou. Lze tvrdit, že trať s horší úrovní geometrie koleje má současně i horší úroveň (vyšší proměnlivost) tuhosti podloží kolejnicových pásů.

4. Literatura

Náprstek, J. & Frýba, L. (1994) Stochastic Modelling of Track and its Substructure. Supplement to Vehicle System Dynamics, Volume 24

Rektorys, K. (1974) Variační metody v inženýrských problémech a problémech matematické fyziky.