

Jaromír Zelenka¹, Jakub Vágner², Aleš Hába³,**Experimentální ověření možností stanovení příčné tuhosti flexi-coil pružin****Klíčová slova:** vypružení, flexi-coil, příčná tuhost, MKP, šroubovitá pružina**1. Úvod**

Příspěvek navazuje na článek uveřejněný ve VTS č. 30 pod názvem „Možnosti stanovení příčné tuhosti flexi-coil pružin“ [1], ve kterém bylo provedeno porovnání výsledků výpočtů příčné tuhosti flexi-coil pružin podle různých metod. Porovnávány byly výsledky výpočtu příčné tuhosti podle empirických vztahů a také výsledky výpočtu metodou konečných prvků (MKP) s použitím velmi zjednodušeného modelu obsahujícího pouze činné závity pružiny.

Předložený příspěvek obsahuje porovnání výsledků experimentálního stanovení příčné tuhosti flexi-coil pružin s výsledky výpočtu pomocí MKP. Porovnání bylo provedeno pro stejné dvě pružiny, které byly podrobeny výpočtům v [1]. Jedná se o pružiny použité ve vypružení lokomotiv. Základní parametry obou pružin jsou uvedeny v tab. 1.

Tab. 1 Základní parametry použitých pružin

Parametr	Označení	Pružina A	Pružina B
Počet činných závitů	n [-]	9,81	7
Celkový počet závitů	N [-]	11,5	9
Průměr drátu	d [m]	0,036	0,048
Střední průměr	D [m]	0,184	0,240

¹ doc. Ing. Jaromír Zelenka, CSc. 1957, Vystudoval VŠDS v Žilině obor DMT – specializace kolejová vozidla. Docent na Dopravní fakultě Jana Pernera Univerzity Pardubice, Katedra dopravních prostředků a diagnostiky, oddělení kolejových vozidel. Tel.: 465 533 006, e-mail: Jaromir.Zelenka@upce.cz

² Ing. Jakub Vágner, 1983, absolvent Dopravní fakulty Jana Pernera Univerzity Pardubice, obor Dopravní prostředky – kolejová vozidla, asistent na DFJP UPa KDPD. Tel.: 466 036 443, e-mail: Jakub.Vagner@upce.cz

³ Ing. Aleš Hába, Ph.D. 1979, absolvent Dopravní fakulty Jana Pernera Univerzity Pardubice, obor Dopravní prostředky – kolejová vozidla, nyní odborný asistent na DFJP UPa KMMČS. Tel.: 465 533 006, e-mail: Ales.Haba@upce.cz

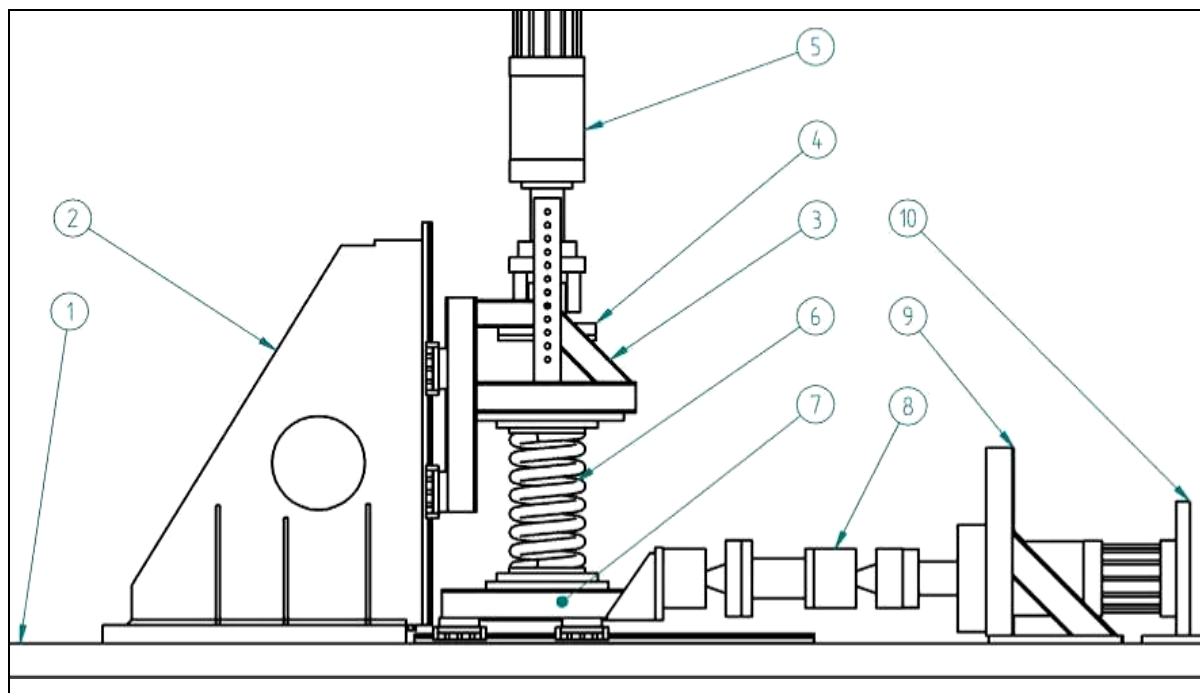
Parametr	Označení	Pružina A	Pružina B
Výška v nezatíženém stavu	H_0 [m]	0,650	0,630
Svislé statické zatížení	Q_z [N]	36 140	68 360
Svislá tuhost	k_z [N.m ⁻¹]	269 700	538 300
Svislá deformace pod statickým zatížením	z [m]	0,140	0,127
Výška při svislém statickém zatížení	H [m]	0,510	0,503
Štíhlostní poměr v nezatíženém stavu	β_0 [-]	3,533	2,625
Štíhlostní poměr při svislém statickém zatížení	B [-]	2,804	2,096
Příčná tuhost podle Wahla	k_{yw} [N.m ⁻¹]	21 000	188 000

2. Zařízení pro experimentální stanovení charakteristik pružin

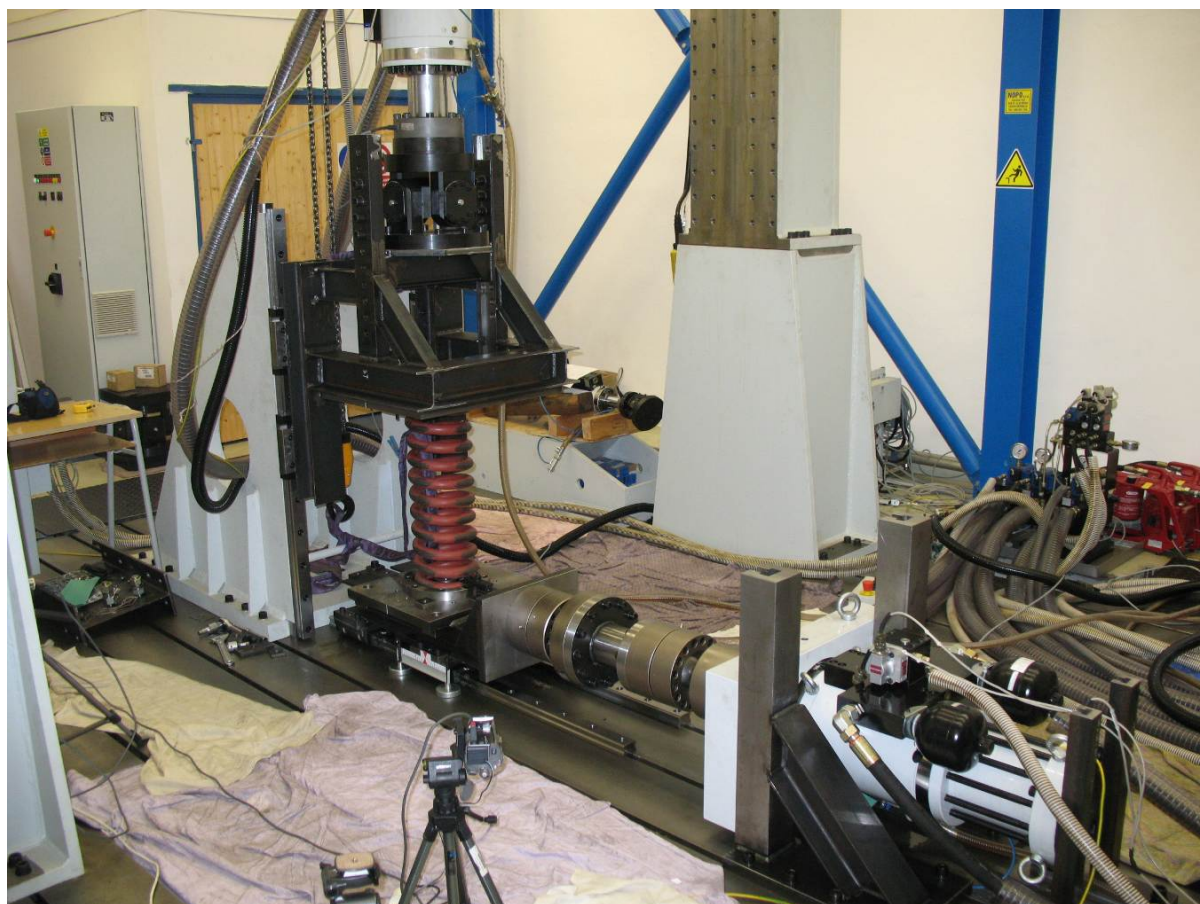
Zkušební zařízení, umožňující stanovení svislé i příčné charakteristiky flexi-coil pružin, bylo vybudováno v prostorách dynamického zkušebního stavu technických laboratoří Dopravní fakulty Jana Pernera v Pardubicích. Nosná konstrukce zařízení využívá některých základních stavebních dílů dynamického zkušebního stavu (viz obr. 1 a obr. 2). Jedná se zejména o vypruženou základovou desku (1) s upínacími drážkami, dva sloupy s překladem a masivní držák válce (2). Oba elektro-hydraulické válce (5, 8) s maximálním zdvihem 200 mm a maximální silou 200 kN, sloužící jako zdroj příslušných sil, jsou rovněž součástí dynamického zkušebního stavu. Ostatní nosné díly byly pro zařízení vyrobeny. Vedení dosedacích ploch závěrných závitů pružiny zajišťují dva vozíky (3, 7), jejichž přesný pohyb umožňují lineární ložiska.

V současné podobě zařízení umožňuje zjišťovat charakteristiky pružin o maximální volné výšce 1 m a maximálním vnějším průměru 0,6 m. Při příčném zatěžování prostřednictvím válce (8) lze plynule hydraulickým posuvem pístu válce měnit příčnou deformaci symetricky v rozsahu ± 100 mm, případně jednostranně do 200 mm. Svislou deformaci lze nastavovat plynule se zdvihem 200 mm a navíc také mechanicky pomocí stavěče (4) s krokem 50 mm, čímž lze docílit libovolného rozsahu svislé deformace pružiny bez ohledu na omezení zdvihem samotného válce (5). Pro oba směry deformace pružiny je maximální možná síla omezena možností elektrohydraulických válců (200 kN). Zkoušená pružina je uložena mezi oba vozíky prostřednictvím příslušných dosedacích desek způsobem, který konstrukčně přesně odpovídá uložení pružiny ve vypružení příslušného kolejového vozidla v provozu.

Popsané zkušební zařízení, sloužící v současnosti výhradně pro zjišťování charakteristik válcových šroubových pružin, lze při jednoduché modifikaci použít i ke zjišťování charakteristik jiných typů pružin či prvků vypružení (kovových, pryžových, vzduchových).



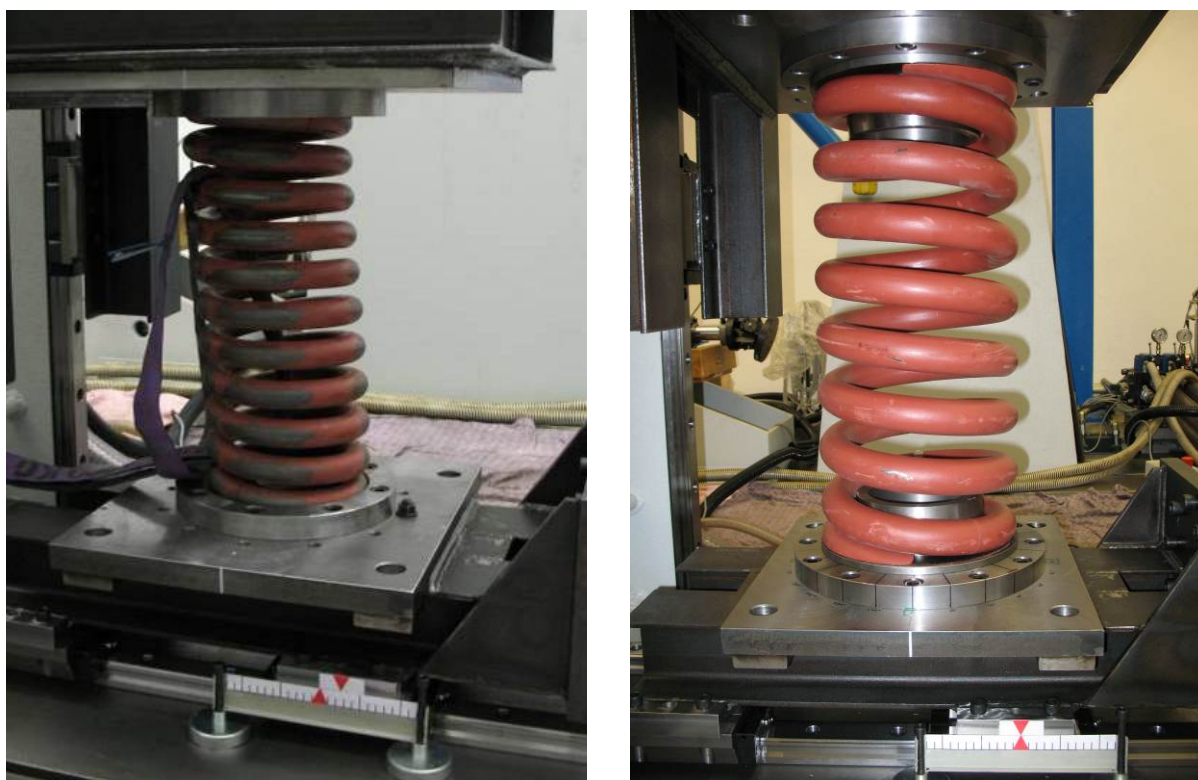
Obr. 1 Schéma zkušebního zařízení pro zjišťování charakteristik flexi-coil pružin



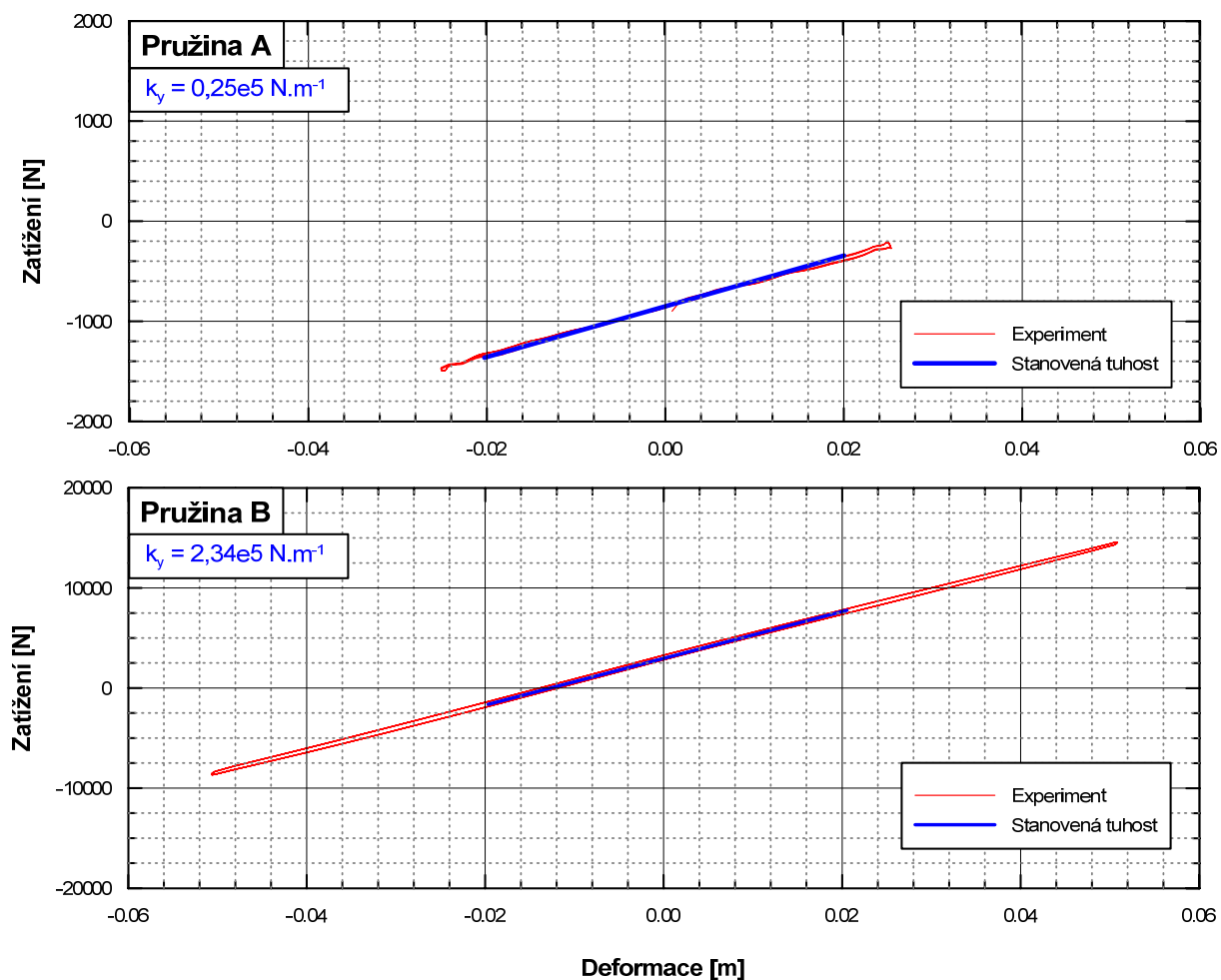
Obr. 2 Zkušební zařízení pro zjišťování charakteristik flexi-coil pružin

3. Experimentální zjištění charakteristik pružin

Cílem experimentu bylo stanovit příčnou charakteristiku dvou různých flexi-coil pružin. Před začátkem příčného zatěžování pružiny byla nastavena svislá deformace pružiny odpovídající svislému statickému zatížení pružiny (viz tab. 1). Následně proběhlo několik cyklů příčné deformace u obou pružin v rozsahu $\pm 0,025$ m u pružiny A a $\pm 0,050$ u pružiny B. Stejné měření bylo provedeno u obou pružin celkem třikrát. Výsledky měření jsou uvedeny v grafu na obr. 4 a v tab. 2.



Obr. 3 Pružiny uložené ve zkušebním zařízení
(pružina A vlevo, pružina B vpravo)



Obr. 4 Výsledky měření příčné tuhosti pružin

Tab. 2 Výsledky měření příčné tuhosti pružin

Veličina	Jednotka	Pružina A	Pružina B
Svislá deformace	[m]	0,140	0,127
Svislá tuhost	[N.m ⁻¹]	271 000	538 000
Příčná tuhost	[N.m ⁻¹]	25 000	234 000

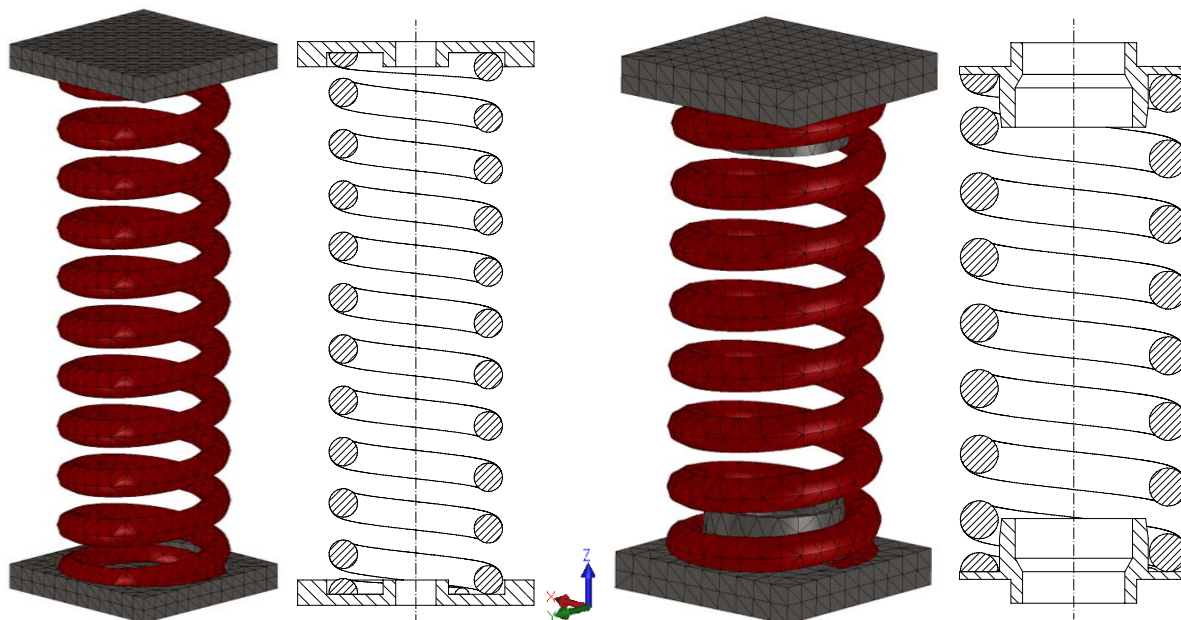
4. Výpočet příčné tuhosti pružin metodou konečných prvků

4.1. Výpočetní model

Výpočetní model každé pružiny je sestaven z vlastního modelu pružiny, který odpovídá jejím parametrům uvedeným v tab. 1 včetně závěrných (obrobených) závitů a dále modelů příslušných dosedacích desek. Spojení obrobené plochy závěrného závitu s dosedací deskou je ve výpočetním modelu řešeno jako vzájemný kontakt dvou ploch. U samotného modelu pružiny se ve výpočetním modelu dále uvažuje možný kontakt závěrného závitu s prvním činným závitem. U pružiny B je navíc ještě

uvažován i kontakt prvních dvou závitů (závěrného a prvního činného) s trnem dosedací desky. Pružiny byly natočeny okolo svislé osy v souladu s experimentem.

Výpočetní model byl rozdělen pomocí nerovnoměrné sítě na 8-uzlové trojrozměrné prvky. Parametry sítě jsou uvedeny v tab. 3, výpočetní modely se zobrazením sítě jsou na obr. 5.



Obr. 5 Výpočetní modely obou pružin (pružina A vlevo, pružina B vpravo)

Tab. 3 Parametry sítě výpočtových modelů pružin

Pružina	Počet prvků	Počet uzlů
A	7686	16086
B	6650	13184

4.2. Způsob zatížení

Pro stanovení příčné tuhosti pružiny bylo zatížení nastaveno stejným způsobem jako při experimentu.

Všem uzlům horní plochy horní dosedací desky bylo zamezeno posuvu ve všech třech směrech souřadného systému, kromě směru osy z (osa pružiny), kde bylo nastaveno posunutí odpovídající svislé statické deformaci pružiny (viz tab. 1).

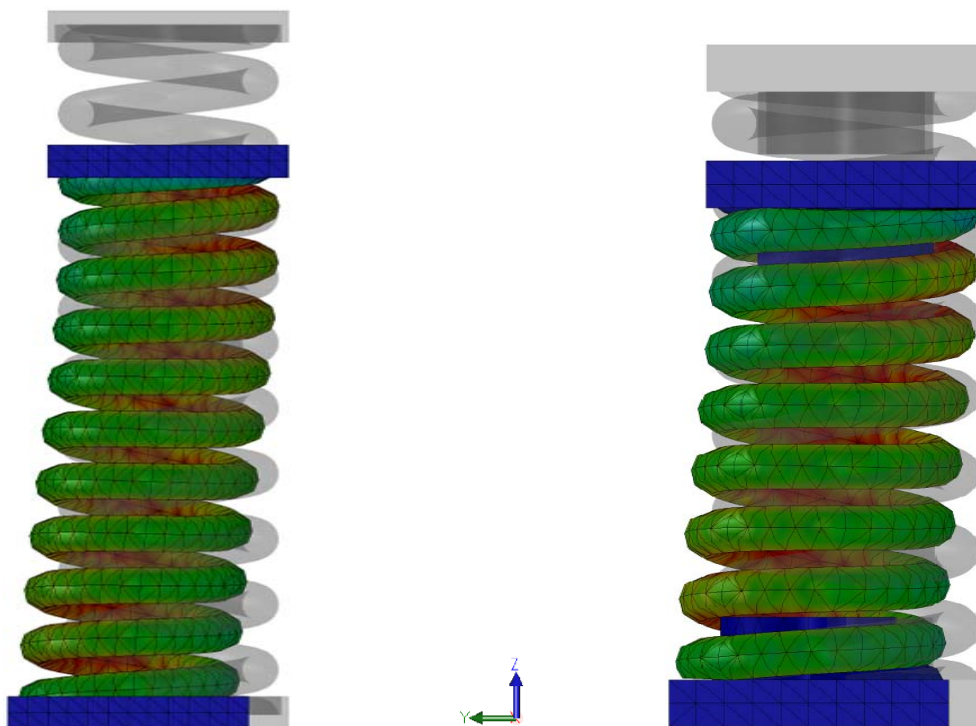
Všem uzlům spodní plochy spodní dosedací desky bylo zamezeno posuvu ve všech třech směrech souřadného systému, kromě směru osy y (osa kolmá na plochu koncového průřezu drátu závěrného závitu), kde bylo nastaveno příslušné posunutí y (viz tab. 4). Pro stanovení svislé a příčné tuhosti pružiny byly po provedení výpočtu odečteny hodnoty reakcí F_z , F_y na spodní ploše desky v příslušných směrech (viz. tab. 4).

4.3. Výsledky výpočtu

Výsledky příslušných reakcí pro jednotlivá příčná posunutí spodní desky u obou pružin jsou uvedeny v tab. 4. Zobrazení obou pružin při příčné deformaci 0,04 m je na obr. 6.

Tab. 4 Reakce spodní desky po zatížení pružiny

y [m]	Pružina A		Pružina B	
	F_z [N]	F_y [N]	F_z [N]	F_y [N]
0,00	34 964	31	64 380	-917
0,01	35 051	207	64 204	1 020
0,02	35 057	382	64 500	2 971
0,03	35 042	562	64 790	4 848
0,04	34 968	729	65 098	6 735

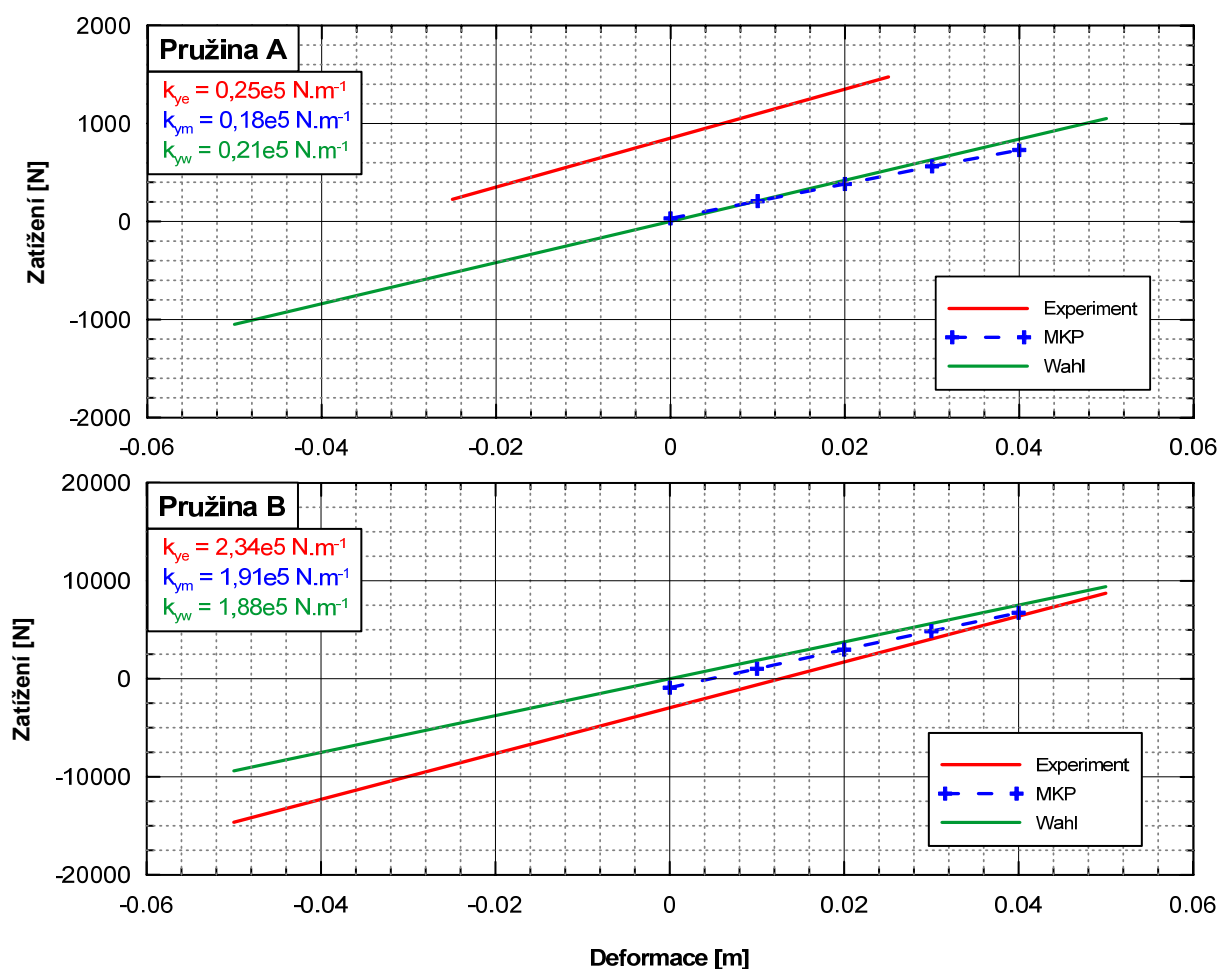


Obr. 6 Zobrazení pružin při příčné deformaci 0,04 m (pružina A vlevo, pružina B vpravo)

5. Zhodnocení a porovnání výsledků výpočtů příčné tuhosti

Charakteristiky příčné tuhosti obou pružin jsou prezentovány v grafech na obr. 7. V každém z obou grafů je pro porovnání vykreslena charakteristika zjištěná experimentálně, výpočtem pomocí MKP a výpočtem z empirického vztahu dle Wahla,

jehož výsledky se od výsledků experimentu liší ze všech empirických metod [1] nejméně. Jednoznačně lze konstatovat, že příčná charakteristika válcové šroubovitě pružiny je lineární. Hodnota příčné tuhosti stanovená výpočtem pomocí MKP se liší od experimentu o 28 % v případě pružiny A a o 18 % v případě pružiny B. Mnohem vyšší rozdíly se však projevily (zejména u pružiny B) v počáteční příčné síle, kterou pružina působí příčně na podložku již při samotném svislém zatěžování, tedy při příčné deformaci $y = 0$ m. Tato síla je nepochybně značně závislá na míře sousostí jednotlivých závitů pružiny. A právě pružina A vykazovala viditelnou osovou nesymetrii, která nebyla ve výpočetním modelu MKP zohledněna.



Obr. 7 Porovnání výsledků výpočtu a experimentálního zjišťování příčné tuhosti flexi-coil pružin

Má-li být metoda konečných prvků spolehlivým prostředkem pro určení příčné tuhosti flexi-coil pružiny, je nezbytné dosáhnout lepší shody výsledků výpočtu s výsledky experimentu. V tomto ohledu se autoři budou dále zabývat zpřesněním výpočetního modelu, zejména pokud se jedná o možný vliv způsobu uložení závěrných (obrobených) závitů pružiny k dosedacím deskám. Předmětem další analýzy výsledků výpočtu i experimentu bude rovněž zjištění vlivu natočení závěrných závitů na velikost příčné tuhosti flexi-coil pružiny.

Literatura

- [1] Vágner, J., Hába, A. *Možnosti stanovení příčné tuhosti flexi-coil pružin*. Vědeckotechnický sborník ČD, 2010, roč. 2010, č. 30.
- [2] ZELENKA J., VÁGNER J.: *Experimentální výzkum flexi-coil pružin*. Zpráva VCKV č. H1-01/2010, Univerzita Pardubice, Česká Třebová, prosinec 2010.
- [3] ZELENKA J., VÁGNER J.: *Aplikace nových prvků do konstrukce kolejových vozidel na základě jejich předchozího ověření pomocí simulačních výpočtů*. Zpráva VCKV č. H1-01/2009, Univerzita Pardubice, Česká Třebová, prosinec 2009.

Příspěvek vznikl za podpory projektu MŠMT 1M0519 „Výzkumné centrum kolejových vozidel“.

Pardubice, duben 2011

Lektoroval: Ing. Pavel Janoušek
VUZ, a.s.