

DYNAMIC INTERACTION OF BRIDGE AND TRUCK WITH SEMI-ACTIVE SUSPENSION

V. Šmilauer¹, J. Máca²

Summary: *Trucks moving around the roads and bridges cause their wear and damage. The mechatronical solution can help by the usage of controlled variable suspension damper that leads to the decrease of road-tyre forces and road damage. Such truck suspensions are called road-friendly truck suspension. This paper investigates whether the road-friendly truck suspension is also bridge-friendly and vice versa and even more whether there exists a specifically bridge-friendly truck suspension which reduces the bridge loading. A simple dynamical model of truck-bridge interaction compares the behaviour of commercial passive, road-friendly and bridge-friendly suspensions on bridge spans 5-50 m. The local reduction of bridge loading by the truck has been detected in all cases.*

1 Model vozidla

Základní model čtvrtauta (Valášek & Kejval, 2002) spolu s mostem, který byl použit během simulace v prostředí SIMULINK/MATLAB, je na obr. 1. Model čtvrtauta je tvořen dvěma hmotnými body, které představují nápravu a podvozek s kabinou řidiče. Pro model byly zadány parametry vycházející ze sériově vyráběných nákladních vozů: náprava $m_1 = 1500$ kg, podvozek $m_2 = 10900$ kg, tuhost pneumatiky $k_{01} = 4900$ kN/m a tuhost pružin na nápravě $k_{12} = 650$ kN/m.

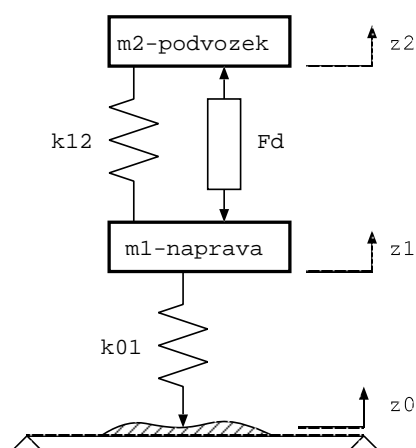
Tlumiče na vozidle byly modelovány jako pasivní a semi-aktivní, tzn. v obou případech žádnou vnější energii není třeba dodávat do systému, dochází pouze k její disipaci buď účinkem tlumení nebo regulací polohy pružiny. Obvykle se jedná o vylepšení klasických hydraulických tlumičů přidáním např. kapaliny, která mění viskozitu účinkem elektrostatického pole. Zpoždění semi-aktivního tlumiče se uvažovalo hodnotou 17 ms.

Pro modelování semi-aktivního tlumiče byl použit model z obr. 2. Tlumič tvoří pružina a regulovatelný zámek. Ten může být spojen nebo uvolněn od konce tlumiče. Pokud se zámek otevře při stlačené pružině, energie pružiny se uvolní. K semi-aktivnímu tlumiči je často paralelně připojen pasivní tlumič pro zabránění kmitání po uvolnění pružiny. Takováto soustava je nelineární a proto řešení odezvy na dynamické zatížení je možné provést pouze numericky.

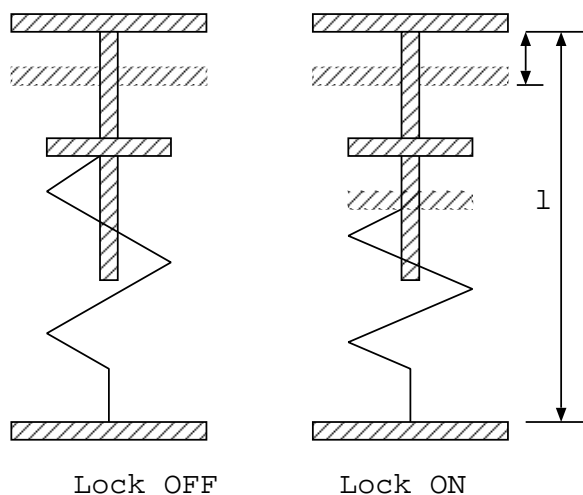
Pro řídicí algoritmus tlumiče je potřeba 12 parametrů, které jsou získány z optimalizací genetickými algoritmy (Šika *et al.*, 1999). Objektívni funkce byla zavedena tak, aby minimali-

¹Vít Šmilauer, Czech Technical University in Prague, Faculty of Civil Engineering, smilauer@post.cz

²Doc. Ing. Jiří Máca, CSc., Czech Technical University in Prague, Faculty of Civil Engineering, Department of Structural Mechanics, Thákurova 7, Praha 6, 166 29, maca@fsv.cvut.cz



Obr. 1: model čtvrtauta s mostem.



Obr. 2: princip semi-aktivního tlumiče

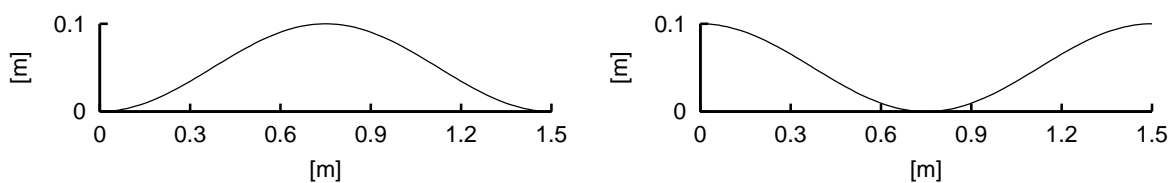
zovala dynamickou sílu mezi kolem vozidla a vozovkou v průběhu celého přejezdu:

$$f_{objective} = \int_0^{\tau} (F_{actual} - F_{stat})^2 dt \quad (1)$$

F_{actual} skutečná síla mezi kolem vozidla a vozovkou

F_{stat} statická síla od vlastní tíhy vozidla

Optimalizace byla nejdříve provedena pro stochastický povrch vozovky, v další fázi pro normovou překážku (bump) a prohlubeň (pot), obr. 3. Stejný postup optimalizace se provedl pro vozidlo jedoucí po mostní konstrukci.



Obr. 3: sinový bump a pot s výškou 0,1 m a délkou 1,5 m

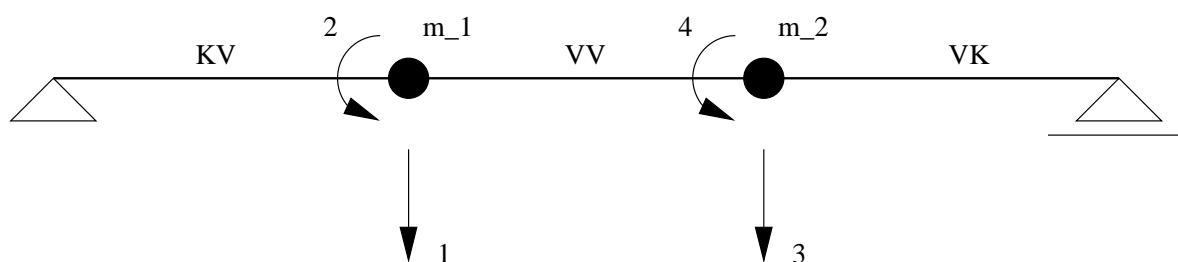
2 Model mostu

Most je modelován jako diskrétní soustava s n -stupni volnosti s předpoklady chování trámového mostu s nekonečně tuhými příčnicí. Vzdálenosti jednotlivých uzlů jsou konstantní po celé délce mostu a v každém uzlu jsou uvažovány dvě deformace: svislý průhyb a pootočení. Pro tuto studii byl most uvažován jako prostý nosník o rozpětí 5 m (krátký most) až 50 m (dlouhý most) a to v ocelovém nebo betonovém provedení. Přijaté zjednodušující předpoklady jsou:

- jedná se o 2D modelování mostu
- materiálové charakteristiky jsou konstantní
- fyzikální vztahy jsou lineární, neuvažuje se vliv smyku
- most je přímý (nenadvýšený, neprohnutý) před přejezdem vozidla

- statický průhyb od vlastní tíhy mostu je zanedbán
- vozidlo jede v ose mostu a most má dokonale tuhé příčnice
- vliv ložisek mostu je zanedbán

Základní schéma mostu, dělení na prvky tří základních typů a konvence deformací jsou zobrazeny na obr. 4. Zavedením tří prutových typů prvků je výhodně určena struktura celé rovnice (2).



Obr. 4: schéma mostu a dělení na prvky.

Při řešení chování mostu se vychází z rovnice kmitání v maticové formě:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{r}} + \mathbf{B}\dot{\mathbf{r}} + \mathbf{K}\mathbf{r} = \mathbf{f} \quad (2)$$

$$\ddot{\mathbf{r}} = \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{f} - \mathbf{K}\mathbf{r} - \mathbf{B}\dot{\mathbf{r}}) \quad (3)$$

\mathbf{M}	matice hmotnosti celé konstrukce
\mathbf{K}	matice statické tuhosti celé konstrukce
\mathbf{B}	matice útlumu celé konstrukce
\mathbf{f}	vektor pravé strany obsahující vnější síly a momenty v uzlech
$\mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}}, \ddot{\mathbf{r}}$	vektor neznámých deformací, rychlostí a zrychlení v uzlech

Tlumení mostu je uvažováno jako Rayleighovo, matice útlumu \mathbf{B} je lineární kombinací matic \mathbf{K} a \mathbf{M} . Výchozí hodnota logaritmického dekrementu útlumu ϑ nemá velký vliv na odezvu mostu, proto se pro všechny typy mostů uvažovala hodnotou 0,05.

Vozidlo jedoucí po mostě působí jako vnější zatížení na most. Jeho kontaktní síla má vždy nezápornou hodnotu. Pokud se vozidlo nachází mezi uzly, je jeho účinek rozložen do sousedních uzlů mostu, kde vyvolává síly a momenty ve vektoru \mathbf{f} . Svislý průhyb mostu a kontaktní síla vozidla jsou jediným pojítkem mezi dvěma jinak oddělenými modely vozidla a mostu. Tím je vytvořen jeden model, kde model vozidla a mostu jsou ve vzájemné interakci. Celý model se řeší jako jeden systém numerickou interakcí v prostředí MATLAB/SIMULINK, most dle rovnice (3). Nejeefektivnější se ukázala implicitní integrace metody Runge-Kutta. Rychlost řešení na současných počítačích odpovídá přibližně reálnému času, tím je možné použít optimalizační genetické algoritmy.

3 Charakteristiky testovaných mostů

Modelované mosty byly vždy uvažovány jako dvoupruhé s chodníky na obou stranách, všechny hodnoty mostů byly vzaty z oboru doporučených hodnot používaných při předběžném návrhu mostu (Hrdoušek & Kukaň, 2000), (Rotter & Studnička, 2001). Pro mosty se v závislosti na

rozpětí parametricky určila ohybová tuhost a stálá hmotnost. První kritické rychlosti mostů ležely nad hodnotami 70 m/s, tyto rychlosti nejsou běžně dosahované. Pro simulaci se použily následující typy a délky mostů:

železobetonový deskový most 5-12 m s redukovanými ohybovými tuhostmi vlivem taženého betonu. Ačkoli se jedná o deskový problém, tento model kvalitativně postačuje a neposkytuje diametrálně odlišné výsledky v porovnání s ostatními konstrukcemi,

předpjatý betonový most 12-30 m tvořen 4-mi nosníky T93,

spřažený ocelobetonový most 15-50 m se třemi ocelovými spřaženými nosníky s železobetonovou deskou.

4 Výsledky simulace přejezdu vozidla po mostě

Pro parametrickou studii mostů byly provedeny simulace přejezdů vozidla po mostní konstrukci. Bump nebo pot začínal vždy uprostřed mostu, umístění na začátek nebo konec mostu prakticky neovlivnilo samotné kmitání mostní konstrukce. Délka překážky byla volena 1,5 m při výšce (hloubce) 0,1 m, obr. 3. Simulován byl i přejezd stochastické vozovky s náhodnou nerovností povrchu na konstrukci mostu.

Při přejezdu vozidla se testovaly tři modely auta, které byly závislé na konfiguraci řízení tlumiče:

pasivní tlumič jako klasický model auta, kde tlumič je charakterizován tuhostí a útlumem, neexistuje jeho řízení,

MOPO model ze zkratky *multi-objective parameter optimisation method*. Tato optimalizace byla použita při přejezdu vozidla po vozovce,

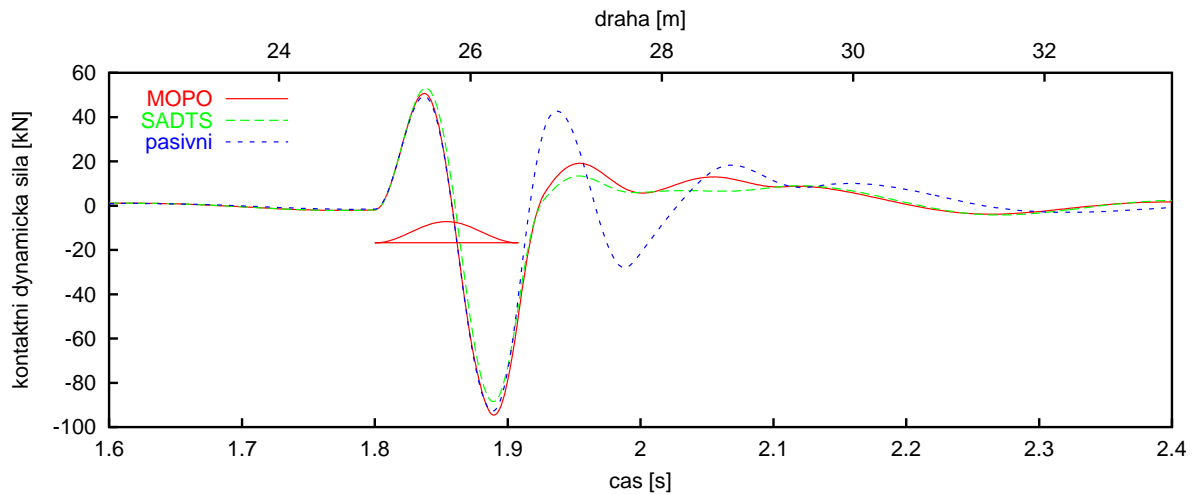
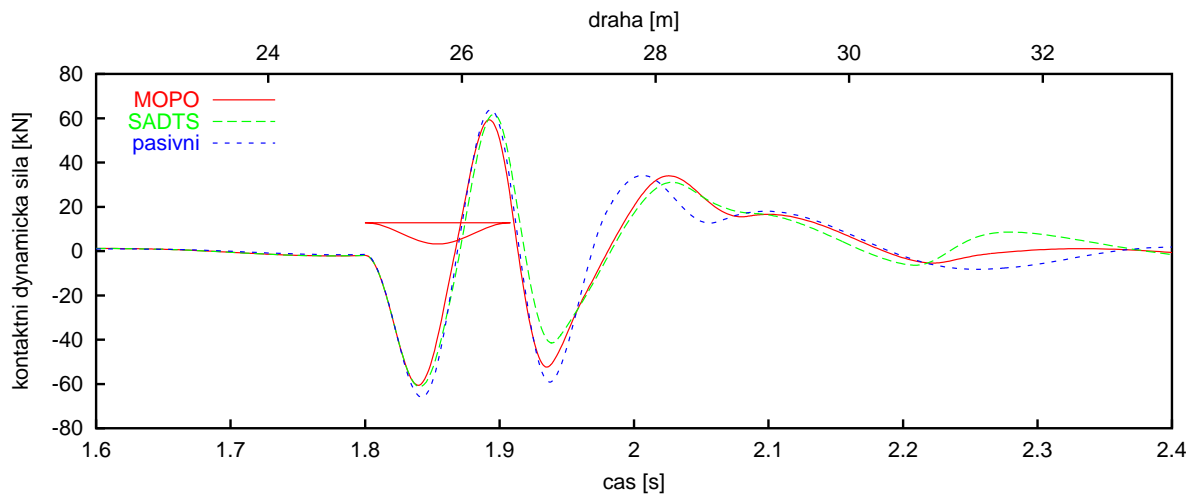
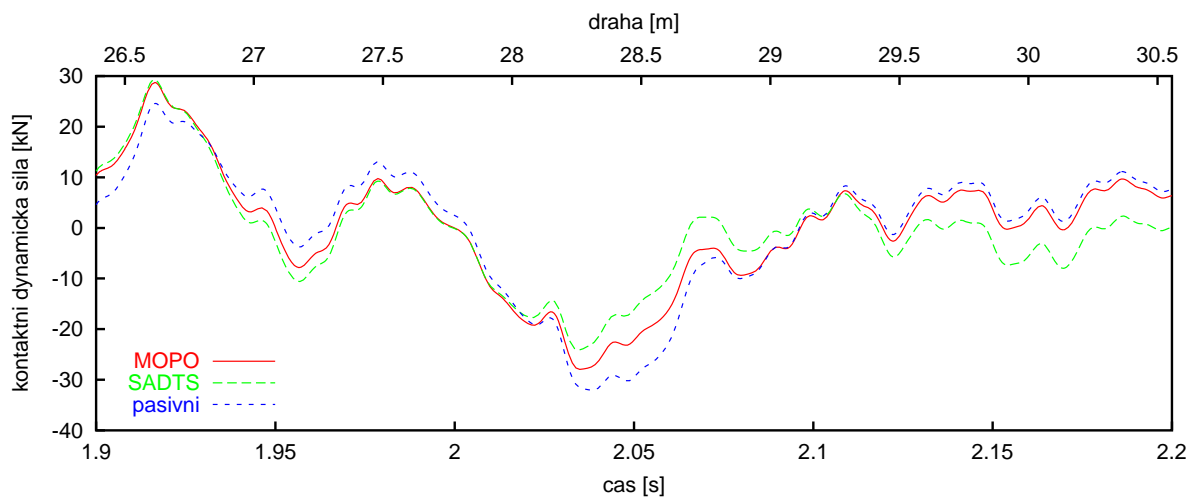
SADTS model ze zkratky *semi-active damping of truck suspension*, kde optimalizace byla prováděna na mostní konstrukci.

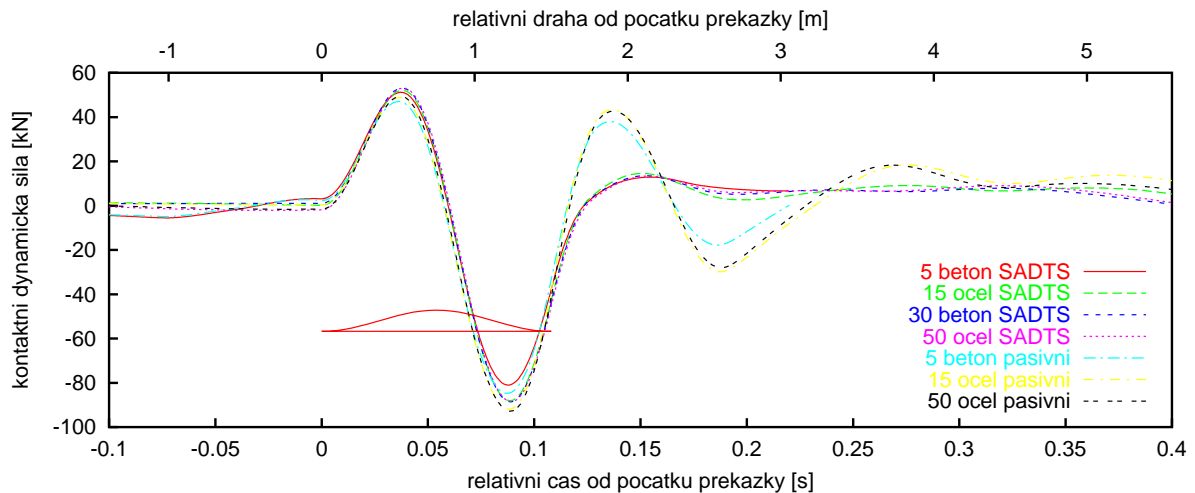
Model přejezdu vozidla po mostě byl během všech simulací s následujícími parametry:

- počet 10 prvků na délku mostu (ukázal se jako dostatečný)
- $\vartheta = 0,05$ jako tlumení ocelové i betonové konstrukce
- rychlost přejezdu vozidla 50 km/h, pro kterou byl tlumič optimalizován
- přesnost řešiče v SIMULINKu 1 % při integračním schématu ode23t trapezoidal s variabilním časovým krokem

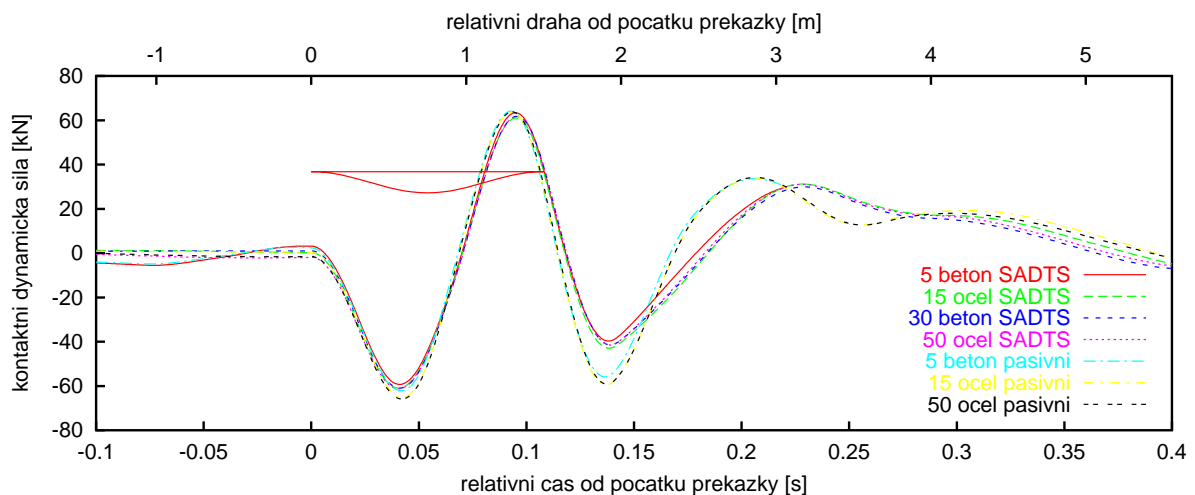
4.1 Dynamická kontaktní síla

Dynamická kontaktní síla je celková kontaktní síla kola s vozovkou minus vlastní tíha vozidla. Kladný směr síly je svisle vzhůru. Pro ocelový most délky 50 m při přejezdu bumpu je rozdíl mezi pasivním, MOPO a SADTS modelem vozidla značný, obr. 5. Ke změně chování kontaktní síly dochází až téměř po přejezdu bumpu. Semi-aktivní tlumiče nedokáží snížit první ráz při nájezdu na bump, ale podstatně omezí další zakmitávání.

Obr. 5: dynamická kontaktní síla při bumpu, ocel, $l=50$ m u středu mostu.Obr. 6: dynamická kontaktní síla, pot, ocel, $l=50$ m u středu mostu.Obr. 7: dynamická kontaktní síla při stochastické vozovce za středem mostu, ocel, $l=50$ m.



Obr. 8: shrnutí z přejezdu bumpu pro mosty 5-50 m rozpětí, SADTS.



Obr. 9: shrnutí z přejezdu potu pro mosty 5-50 m rozpětí, SADTS.

Pro přejezd potu není rozdíl mezi typy vozidel výrazný, obr. 6. Při stochastické vozovce na obr. 7 vychází kontaktní síla pro semi-aktivní vozidlo lépe pouze v průměru, může lokálně přesahovat hodnoty pasivního tlumiče. Přesto má model SADTS asi o 15 % nižší finální hodnotu objektivní funkce pro všechny typy mostů.

Shrnutí přejezdů bumpů mostů délek 5-50 m je na obr. 8. Ukazuje se, že při přejezdu bumpu rychlostí 50 km/h téměř nezáleží na typu a rozpětí mostu. Semi-aktivní a pasivní tlumič se chovají velmi podobně až do vrcholu bumpu, semi-aktivní tlumič však podstatně zeslabí až další vrchol kontaktní dynamické síly kola a změni fázi síly v porovnání s pasivním tlumičem. Protože běžná nákladní vozidla mají podobnou vlastní frekvenci kmitání nápravy, po bumpu se na vozovce vytvoří další nerovnosti v určitých vzdálenostech. Naproti tomu semi-aktivní tlumič po přejezdu bumpu další nerovnosti na vozovce vlivem dynamické síly téměř nevytváří.

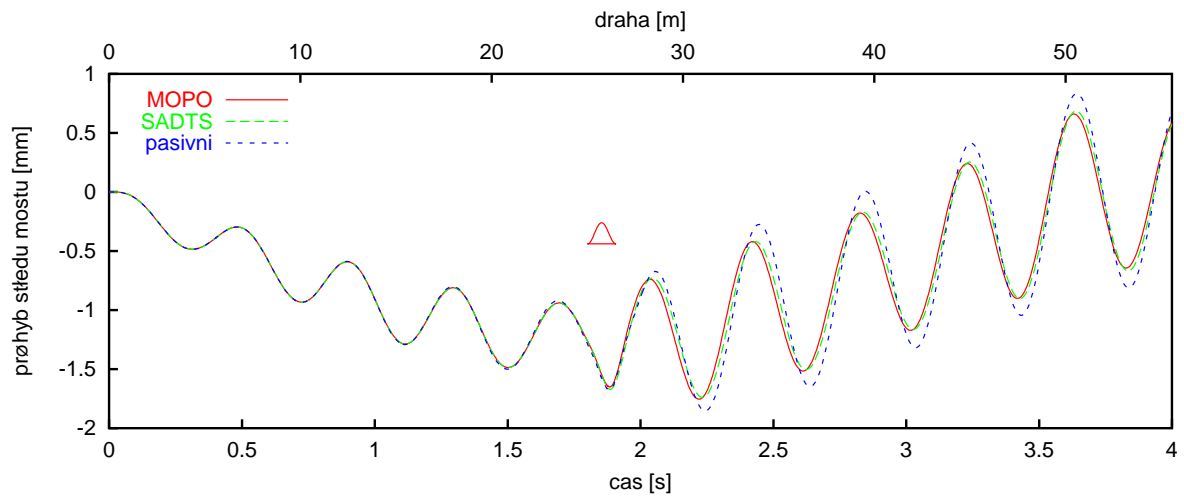
V přejezdu potu není významný rozdíl mezi pasivním a semi-aktivním tlumičem, obr. 9. Příčina je v samotné konstrukci tlumiče.

4.2 Výchyly středu mostu

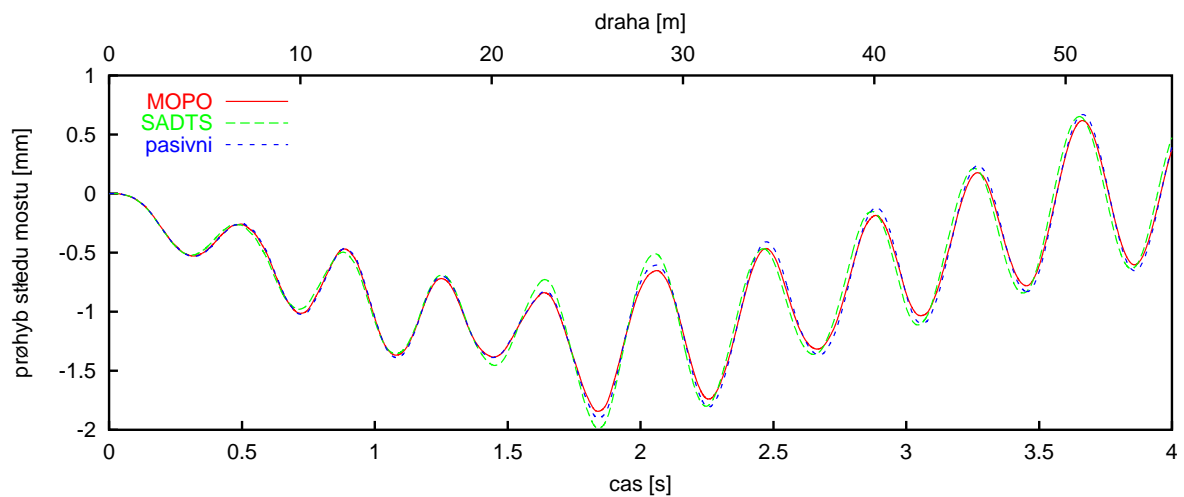
Pro krátké mosty tvoří čtvrtauto asi pětinu návrhového zatížení, pro dlouhé mosty je to jen malá část, proto jsou výchyly délek všech mostů srovnatelné. Při studii se ukázal malý vliv modelu auta na maximální vzniklé průhyby uprostřed mostu pro dlouhé i krátké mosty. Nedochozí ani k přílišné odchylce od sinusových vln vlastního kmitání při přejezdu potu, ani bumpu, obr. 10. Samotný vliv semi-aktivního tlumení na vlastní konstrukci mostu je malý a z toho i vyplývající malá změna vnitřních sil na prutové konstrukci mostu. Pro stochastickou vozovku a některé typy mostů vychází amplituda kmitání středu mostu o málo hůře pro MOPO a SADTS než pro pasivní tlumič, obr. 11.

Při mostech malých rozpětí již významně záleží na tvaru překážky. Například u betonového deskového mostu rozpětí 5 m se fáze kmitání středu mostu může dokonce otočit v závislosti na přejeté překážce, obr. 12. Stochastická vozovka dává v tomto případě průměrnou hodnotu mezi přejezdem bumpu a potu.

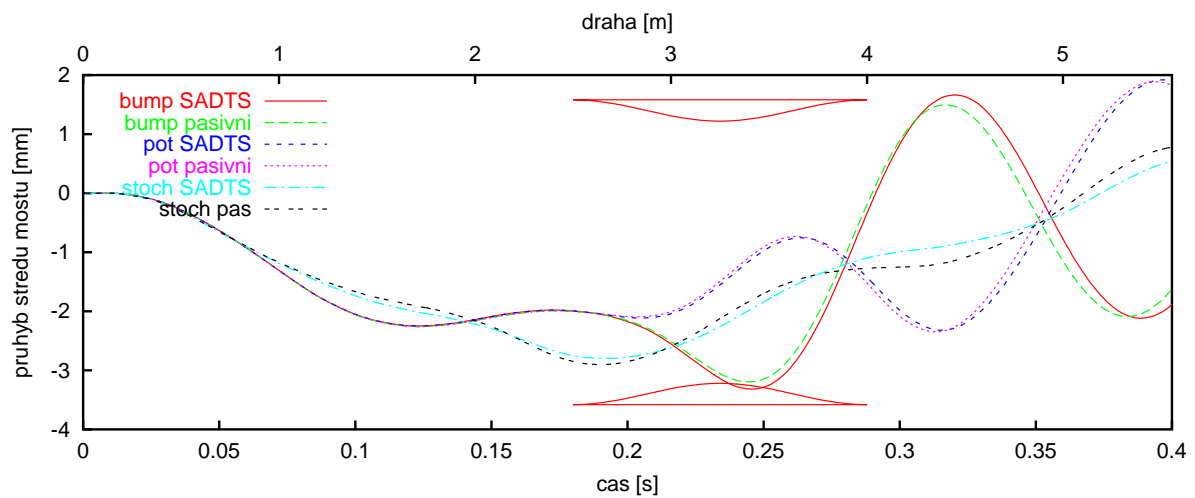
Obr. 13 porovnává průhyby středů mostů o rozpětích 5 až 50 m modelu vozidla SADTS při přejezdu bumpu se statickými průhyby (zatížení vozidlem v polovině mostu, zobrazeno body). Pro menší mosty je patrné jejich větší vybuzení přejezdem bumpu než pro dlouhé mosty. Stejně tvrzení platí při přejezdu potu, obr. 14. Toto zjištění koresponduje s vyšší hodnotou dynamického součinitele pro krátké mosty při jejich navrhování. Na přejezdu stochastické vozovky se neobjevuje žádný velký budící impuls a hodnoty průhybů se blíží statickým průhybům, obr. 15.



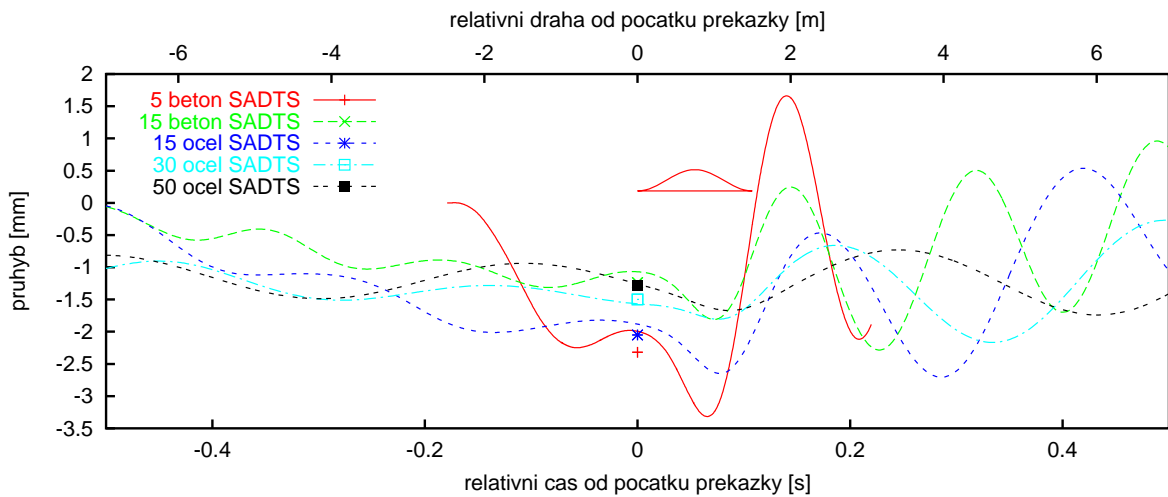
Obr. 10: průhyb středu mostu, bump, ocel, $l=50$ m, po 50 m most volně dokmitává.



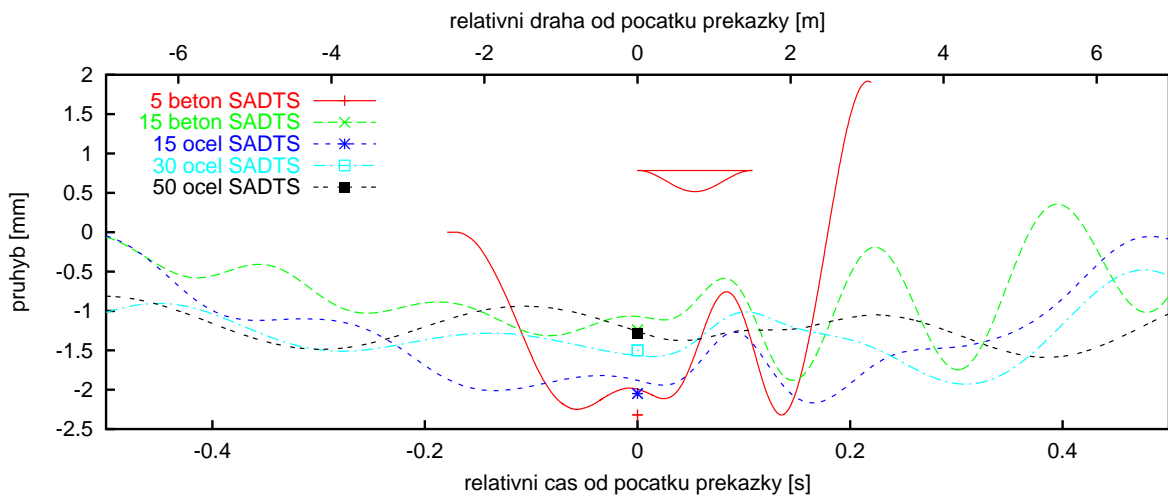
Obr. 11: průhyb středu mostu při stochastické vozovce, ocel, $l=50$ m, po 50 m most volně dokmitává.



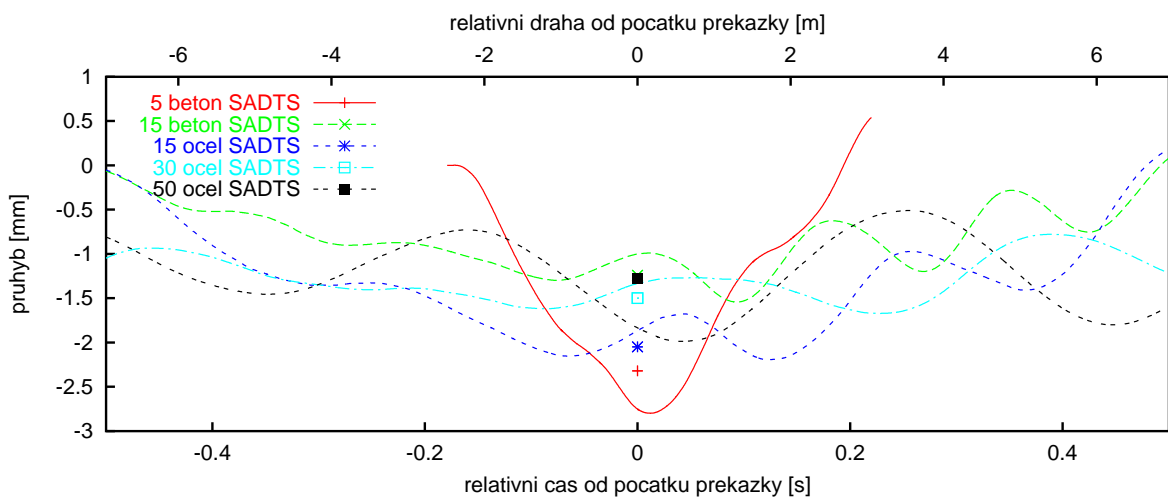
Obr. 12: průhyb železobet. středu mostu $l=5$ m, od 5 m je volně tlumené kmitání.



Obr. 13: průhyby středů mostů 5-50 m při bumpu v porovnání se statickými průhyby, SADTS.



Obr. 14: průhyby středů mostů 5-50 m při potu v porovnání se statickými průhyby, SADTS.



Obr. 15: průhyby středů mostů 5-50 m při stochastické vozovce v porovnání se statickými průhyby, SADTS.

5 Závěr

Semi-aktivní tlumič nachází uplatnění na všech konstrukcích při snížení lokálního namáhání nerovné vozovky komunikace. První výchylka kontaktní dynamické síly při přejezdu překážky téměř nezávisí na typu a délce mostu, obr. 8 a 9. Semi-aktivní tlumič funguje nejlépe pro bump, pak pro pot a stochastickou vozovku, při přejezdu bumpu se velmi utlumí další výchylky dynamické kontaktní síly. Z toho vyplývá i větší důraz na hladkou vozovku (příčina) než na konstrukci semi-aktivních tlumičů (eliminace následků).

Vliv překážky na odezvu mostní konstrukce se nejvíce projevuje na mostech malých rozpětí. Maximální průhyby dlouhých i krátkých mostů téměř nezávisí na pasivním či semi-aktivním tlumiči vozidla. Z hlediska nosné konstrukce mostu je přínos semi-aktivního tlumiče malý pro všechny délky mostů.

Pro další optimalizaci je připraven model na mostě se dvěma semi-aktivními nápravami, kde se očekává zlepšení při jejich vzájemném řízení. Po testech čtvraut se budou moci vytvořit 3D modely aut a je testovat při různých přejezdových rychlostech překážek i na prostorových modelech mostů. Protože spotřeba energie semi-aktivních tlumičů je řádově v desítkách wattů, dá se očekávat jejich rozšíření do automobilové nákladní dopravy.

6 Poděkování

Poděkování patří spolupracovníkům ze Strojní fakulty ČVUT, kteří vytvořili model auta, předali své zkušenosti se SIMULINKem a GAČR za grant č.103/01/1528.

7 Literatura

- [1] Hrdoušek, V., Kukaň, V. **Betonové konstrukce a mosty, doplňkové skriptum**, vydavatelství ČVUT, 2000.
- [2] Rotter, T., Studnička, J. **Ocelové konstrukce 30, ocelové mosty, pomůcka pro cvičení**, vydavatelství ČVUT, 2001.
- [3] Šika, Z., Steinbauer, P., Valášek, M. **The experience with optimization of highly non-linear dynamic systems by genetic algorithms in MATLAB environment**, 7. ročník konference MATLAB, 1999.
- [4] Valášek, M, Kejval J. **Control of Truck Suspension as Bridge-Friendly**, Structural Dynamics, EURO DYN 2002, edited by Sweets & Zeitlinger, Lisse, 2002.