

DYNAMIC BRIDGE RESPONSE FOR A TRUCK WITH CONTROLLED SUSPENSIONS

V. Šmilauer¹, J. Máca², M. Valášek³

Summary: *The effect of a truck with controlled suspension traversing a bridge is examined in order to find benefits for the bridge construction. A half-car model with two independently driven axles is coupled to a simply supported bridge (truss, plate model) with the span from 5 to 50 m. Surface profile of the bridge deck is either stochastic or with a bump or pot in the mid-span. Numerical integration in MATLAB/SIMULINK environment solves coupled dynamic equations of motion with optimized truck suspensions. Rear axle generates prevailing load and highly determines bridge response. Semi-active damper significantly decreases road-tyre forces and in average reduces mid-span deflections of bridges when compared to the passive damper.*

1. Úvod

Úroveň návrhového porušení vozovky vychází z třídy dopravního zatížení, která se stanoví z intenzity provozu těžkých nákladních vozidel. Prognózy stanovují každoroční zvyšování intenzity těchto vozidel a na obzoru jsou nákladní vozidla s více nápravami a s větším počtem vleků. Nerovnosti na povrchu vozovky a přejezd překážek vyvolávají ke statické navíc dynamickou kontaktní sílu, jejíž průběh lze však výhodně omezit. Vývoj se ubírá směrem řízených tlumičů na nápravách, které jsou schopny disipovat energii vznikající chvěním nápravy a tím omezit namáhání vozovky. V oblibě jsou semi-aktivní tlumiče, které mají malé energetické nároky na řízení a jsou kompromisem mezi klasickými pasivními a aktivními tlumiči z hlediska chování i ceny.

Koncept *road-friendliness* byl rozšířen také pro mosty jako *bridge-friendliness*, kde jsou zkoumány a optimalizovány vlastnosti tlumičů s ohledem na mostní konstrukci [2]. Do výpočtu jsou navíc uváženy průhyby a dynamická odezva mostní konstrukce. Cílem studie je ukázat kladný přínos semi-aktivních tlumičů na vozovku i na samotnou mostní konstrukci. Studie [1] na modelu čtvrtauta ukazuje, že pro modely mostů, kde jejich vlastní frekvence leží blízko vlastní frekvence nápravy, omezuje semi-aktivní tlumič významně průhyby mostu i sílu kolo-vozovka.

¹Ing. Vít Šmilauer, Czech Technical University in Prague, Faculty of Civil Engineering, Department of Structural Mechanics, Thákurova 7, Praha 6, 166 29, vit.smilauer@fsv.cvut.cz

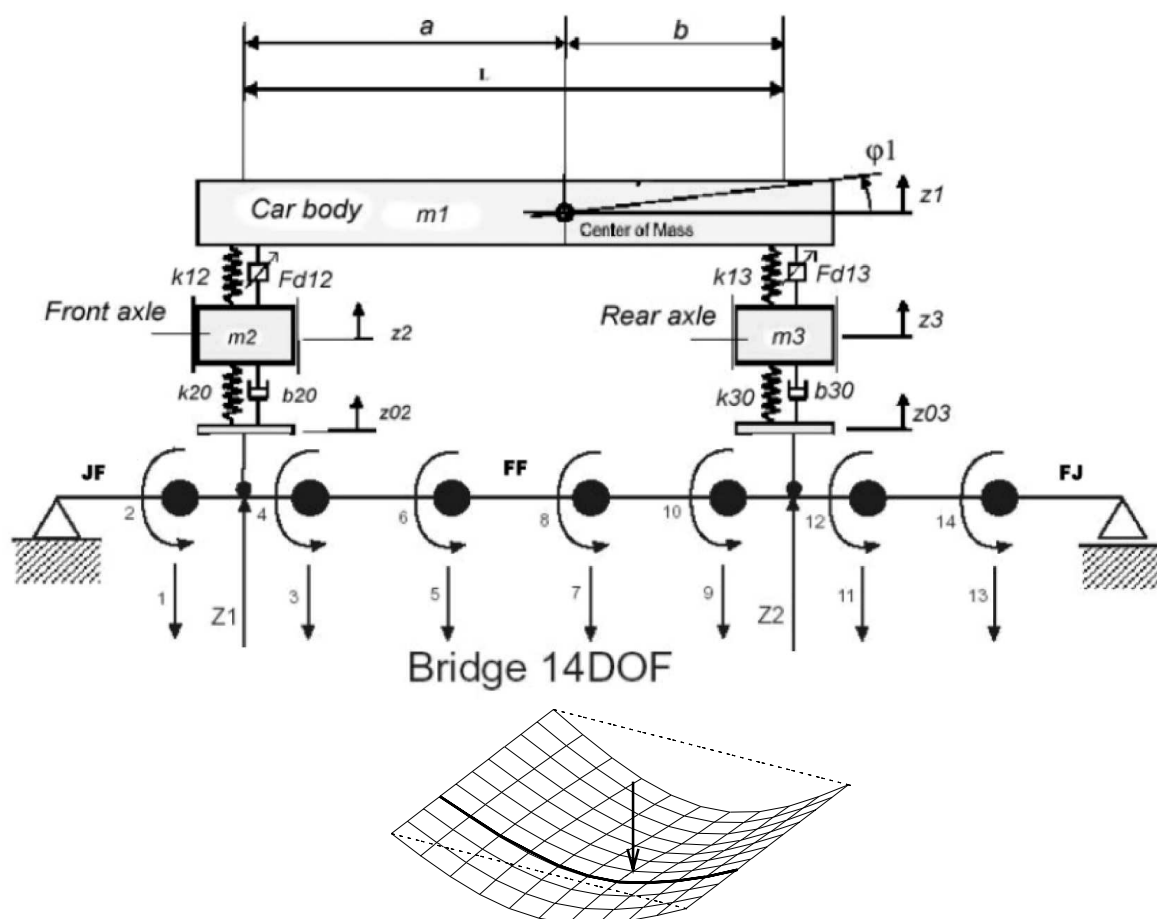
²Doc. Ing. Jiří Máca, CSc., Czech Technical University in Prague, Faculty of Civil Engineering, Department of Structural Mechanics, Thákurova 7, Praha 6, 166 29, maca@fsv.cvut.cz

³Prof. Ing. Michael Valášek, DrSc., Czech Technical University in Prague, Department of Mechanics, Karlovo nám. 13, Praha 2, 121 35, valasek@fsik.cvut.cz

2. Model půlauta a deskového mostu

Trámový 2D model mostu rozpětí 5-50 m, princip tlumiče a model čtvrtauta je popsán v práci [4]. Kvalitativní výsledky z předešlých studií byly použity pro sestavení přesnějších modelů mostů a vozidla LIAZ [3]. Na obrázku 1 je schéma modelu půlauta s trámovou a deskovou mostní konstrukcí, s parametry vozidla $m_1=15$ t, $m_2=0,75$ t, $m_3=1,5$ t, $a=4$ m, $b=1,3$ m a s tuhostmi $k_{12}=430$ kN/m, $k_{13}=650$ kN/m, $k_{20}=1700$ kN/m, $k_{30}=4900$ kN/m bez tlumení b . Síly F_{d12} a F_{d13} jsou síly semi-aktivního nebo pasivního tlumiče, k nerovnostem vozovky se přičítá průhyb mostu Z_1 a Z_2 . Pro ověření výstižnosti modelu krátkého trámového mostu posloužil deskový most se stejnými mechanickými parametry. Vozidlo přejíždělo prostě podepřenou desku rozpětí 10 m co nejvíce u okraje vozovky.

Řídicí algoritmus jednoho semi-aktivního tlumiče vyžaduje 12 parametrů získaných z optimalizace genetickými algoritmy při přejezdu mostu, pro nezávislé řízení přední a zadní nápravy je použito celkem 24 různých konstant. Na přední nápravě jsou paralelně spojené dva a na zadní čtyři tlumiče, všechny mohou být přepnuty do pasivního módu tlumení. Celá soustava byla řešena numerickou integrací pohybových rovnic v prostředí MATLAB/SIMULINK obou modelů, spojenými kontaktní silou a svislým posunem povrchu vozovky.



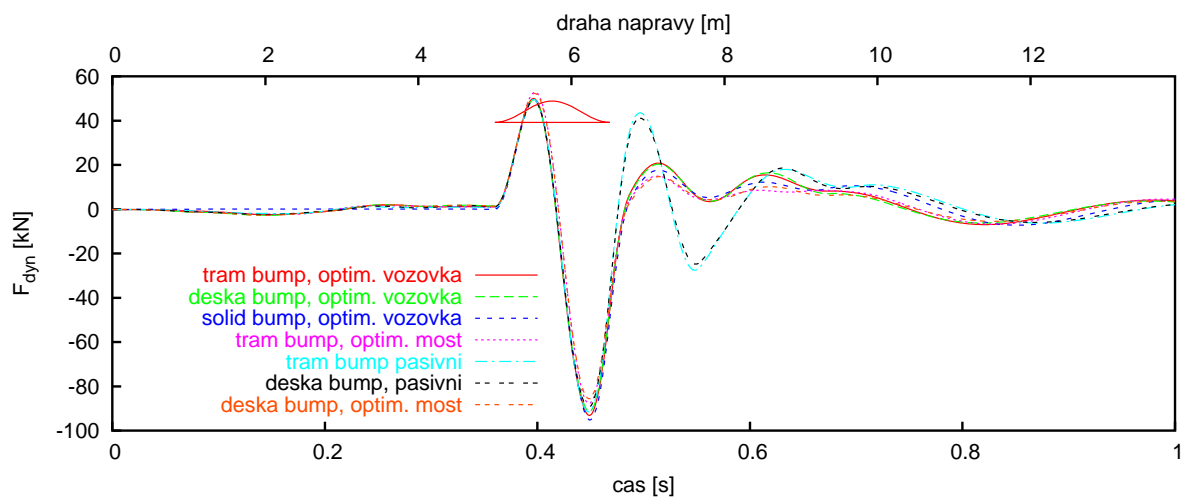
Obrázek 1: nelineární 2D model půlauta přejíždějící trámový most a deskový model mostu pro ověření výstižnosti modelu trámového mostu.

Všechny přejezdy modelu půlauta proběhly s následující parametry:

- počet 8 prvků na délku trémového mostu, 100 prvků pro deskový most,
- $\vartheta = 0.05$ jako tlumení ocelové i betonové konstrukce,
- rychlost přejezdu vozidla 50 km/h, pro kterou byly tlumiče optimalizovány,
- přesnost řešiče v SIMULINKu 1 % při integračním schématu ode23t trapezoidal s variabilním časovým krokem,
- nerovnosti typu bump i pot jsou částí funkce sin s amplitudou 20 mm a délky 1,5 m, stochastická vozovka s amplitudou rovněž 20 mm.

3. Porovnání odezvy trémového a deskového mostu

Pro odezvu mostu se starším modelem čtvrtauta byla porovnána dynamická kontaktní síla, a to na trémovém mostu rozpětí 10 m, na ideální pevné a rovné vozovce a na deskovém modelu se shodným tvarem bumpu, obr. 2. Z dynamické síly vyplývá, že více než na modelu mostu záleží na řízení tlumiče nápravy.

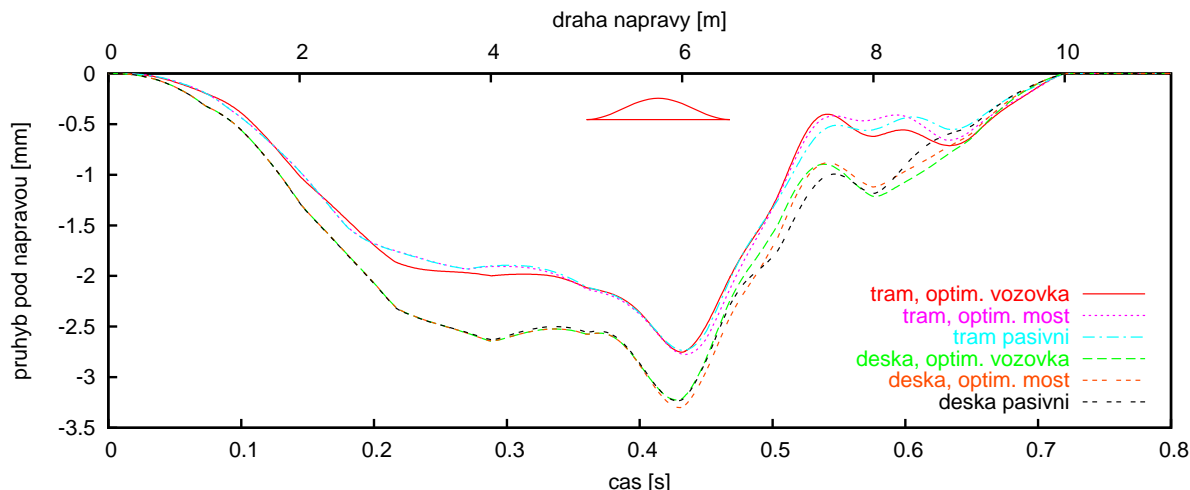


Obrázek 2: dynamická kontaktní síla v závislosti na volbě modelu mostu při přejezdu bumpu. Použity jsou pasivní a semi-aktivní tlumiče optimalizované pro přejezd na mostě.

Průhyby pod jednou nápravou na deskovém mostě jsou vlivem nesymetrie zatížení a ohybové tuhosti větší než na trémovém, obr. 3. Průhyby jsou zvětšeny o max. 15 % oproti trémovému mostu a jsou téměř lineárně závislé. Vlastní frekvence obou typů mostů vychází pro ohybové kmitání podobně, tab. 1. Na průhyby deskového mostu má způsob řízení tlumičů vozidla malý vliv. První kritická rychlost přejezdu se shoduje s trémovým mostem a pro běžné rychlosti nemá význam.

deskový most	3.612	5.757	12.14	14.64	6.85	23.44	23.49	32.56
trémový most	3.622	-	-	14.49	-	-	-	32.60

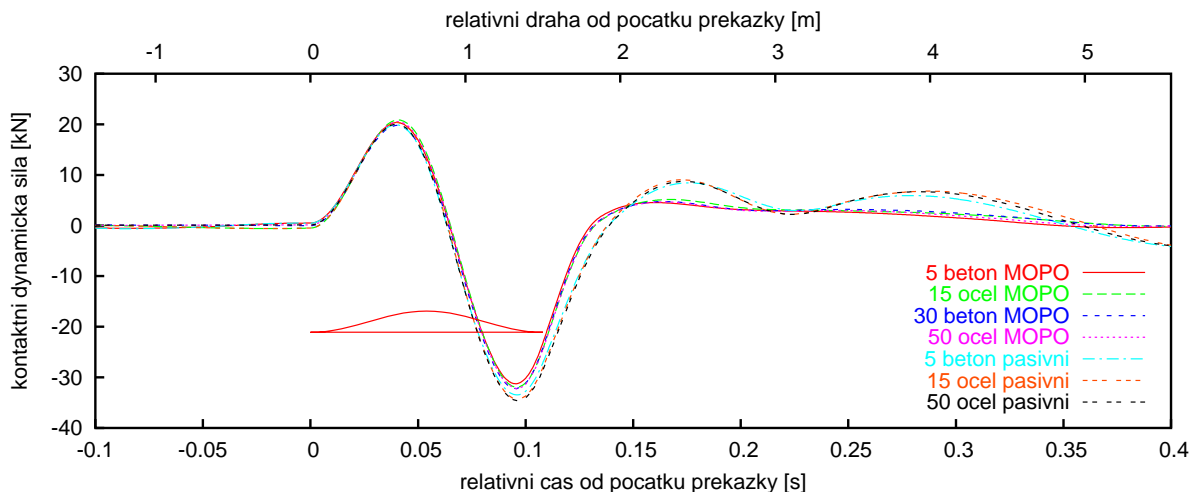
Tabulka 1: vlastní frekvence na deskovém a trémovém mostě [Hz].



Obrázek 3: průhyby po přejezdu bumpu na deskovém a trémovém mostě.

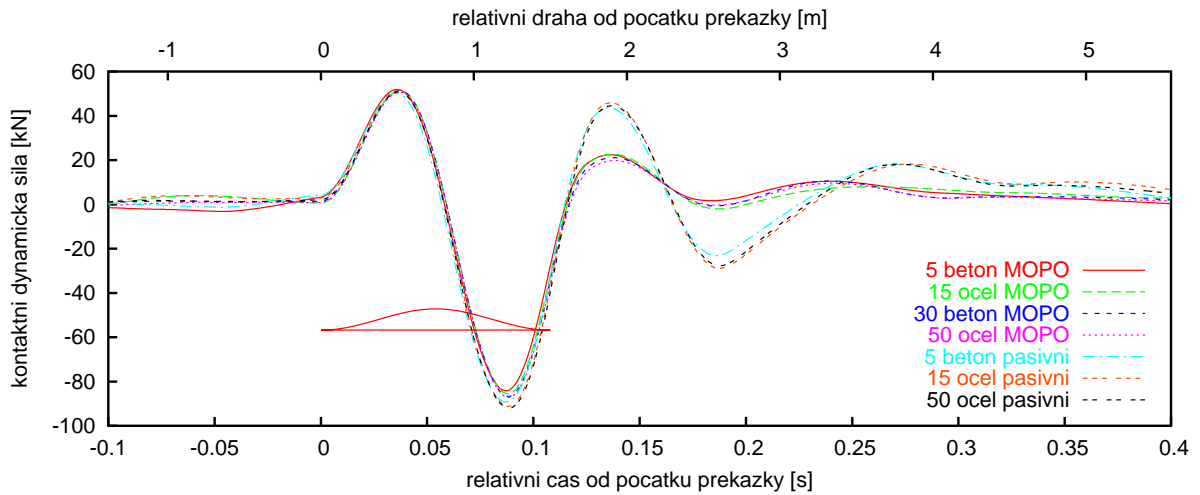
4. Dynamická kontaktní síla na trémovém modelu mostu

Dynamická kontaktní síla je celková kontaktní síla mezi kolem a vozovkou bez statické složky, s kladným směrem síly svisle vzhůru. Řídící algoritmus semi-aktivního tlumiče je označen jako MOPO (*multi objective parameter optimisation method*) a tyto parametry řízení jsou získány z nezávislé optimalizace obou tlumičů při přejezdech na mostech. Největší efekt tlumení je u zadní nápravy a vyplývá z poměru statického zatížení obou náprav 1:3.

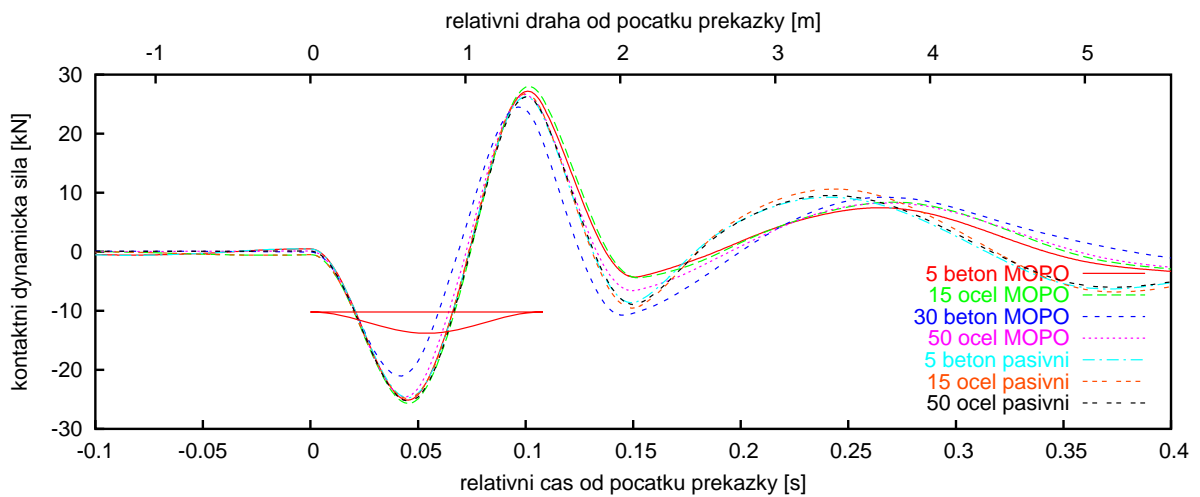


Obrázek 4: přední náprava - shrnutí z přejezdu bumpu pro mosty 5-50 m rozpětí.

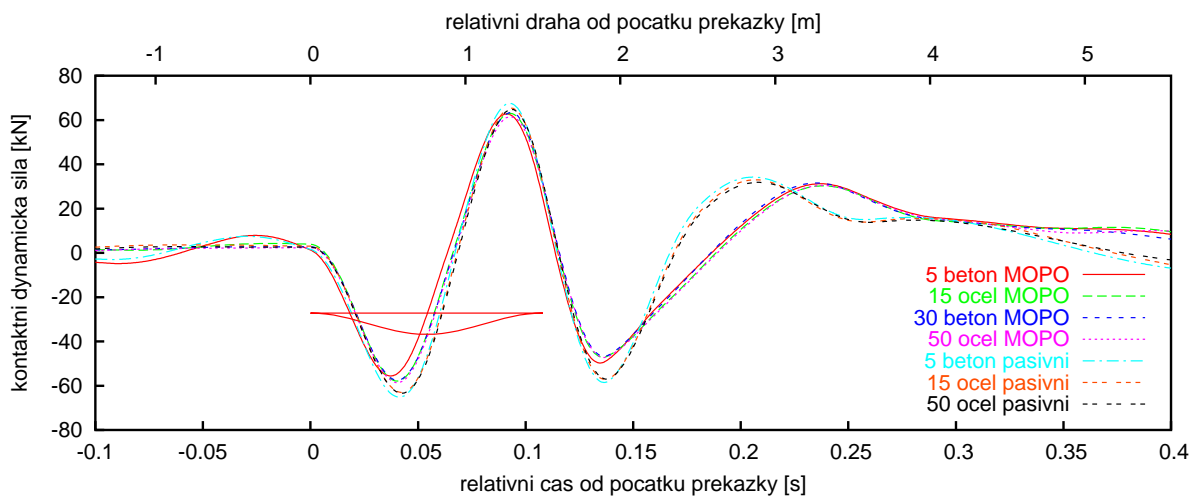
Ke změně chování kontaktní síly dochází až téměř po přejezdu překážky. Semi-aktivní vozidlo nedokáže snížit první ráz při přejezdu na překážku, ale podstatně omezí další zakmitávání. Podobně jako na obr. 2, při přejezdu bumpu rychlostí 50 km/h téměř nezáleží na typu a rozpětí mostu. Shrnutí přejezdů bumpů na mostech délek 5-50 m pro přední a zadní nápravu je na obr. 4 a 5.



Obrázek 5: zadní náprava - shrnutí z přejezdu bumpy pro mosty 5-50 m rozpětí.



Obrázek 6: přední náprava - shrnutí z přejezdu potu pro mosty 5-50 m rozpětí.

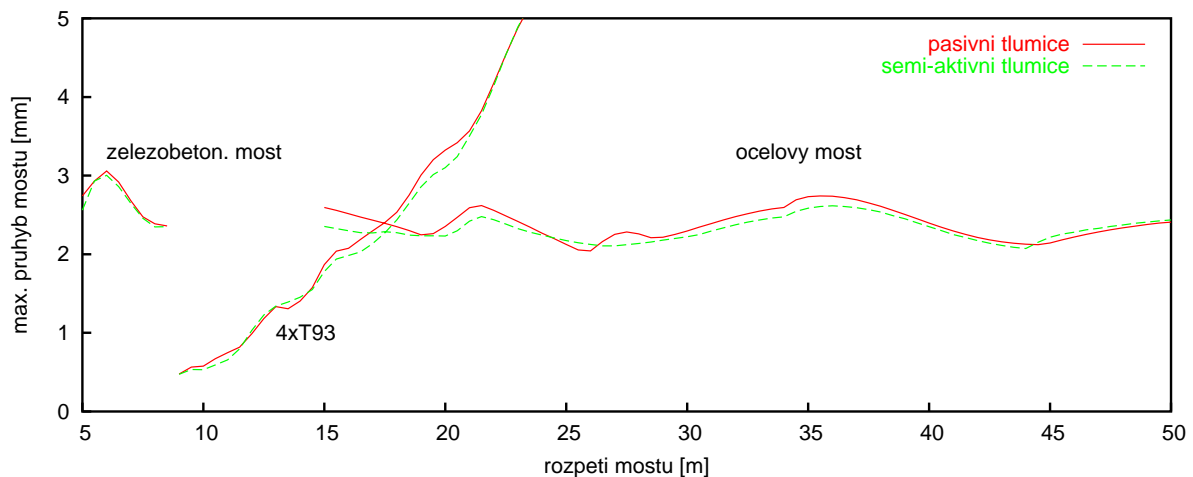


Obrázek 7: zadní náprava - shrnutí z přejezdu potu pro mosty 5-50 m rozpětí.

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 může změnit fázi síly v porovnání s pasivním tlumičem. Ze souhrnu přejezdů vyplývá malý vliv předního MOPO tlumiče vzhledem k zadnímu. V přejezdu potu je významný posun fáze kontaktní síly, absolutní hodnoty síly nevykazují významný rozdíl mezi pasivním a semi-aktivním tlumičem pro zadní ani přední nápravu, obr. 6, 7. Při porovnání se starším modelem čtvrtauta vychází velmi podobný průběh kontaktní dynamické síly při přejezdu překážky.

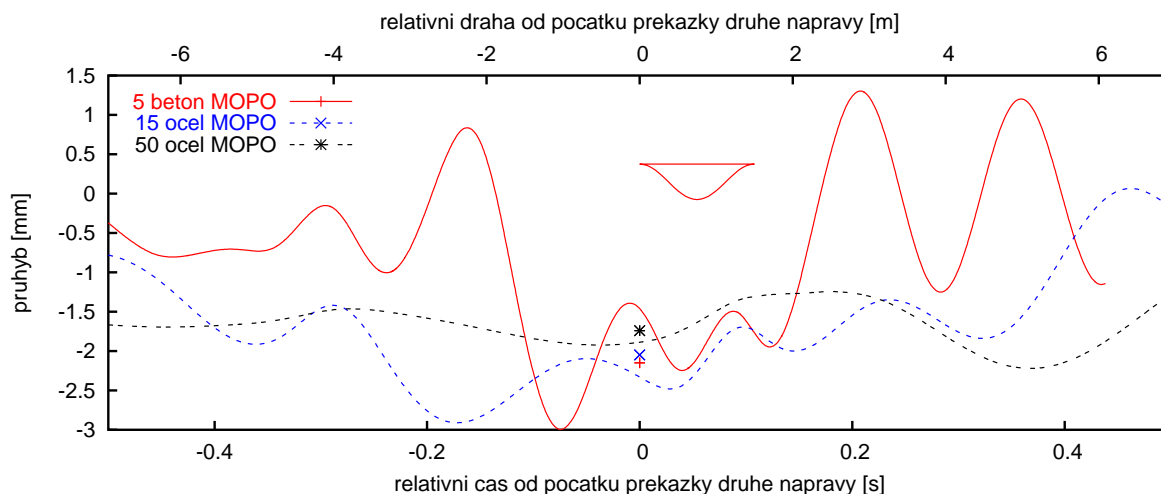
5. Výchyly středu trámového modelu mostu

Průhyb uprostřed mostu je vhodná integrální veličina zachycující účinek vozidla na mostní konstrukci. První vlastní frekvence mostů [4] leží pod vlastními frekvencemi půlauta a soustavu se nepodaří vhodně vybudit. Podobně první kritické rychlosti přejezdu jsou přes 220 km/h pro uvažované mosty rozpětí 5-50 m, proto nikdy nedojde k rezonanci a tlumič má lokální charakter redukce dynamické kontaktní síly. Při uvažování stochastické vozovky, která se nejvíce blíží reálnému stavu vozovky je rozdíl v průhybech při semi-aktivním a pasivním tlumení na obr. 8. Semi-aktivní tlumiče redukuje v průměru průhyb o 2,5 % na mostech o rozpětích 5-50 m.



Obrázek 8: maximální průhyby mostů při přejezdu stochastické vozovky pro pasivní a semi-aktivní tlumení a různé typy mostů.

Na mostech s rozpětím menším než 5,3 m je na mostě přítomná pouze jedna náprava. Protože více váhy je soustředěno do zadní nápravy, je i odečet vzdálenosti proveden od nájezdu druhé nápravy na most. Vliv překážky je podobný jako pro model čtvrtauta, nejvíce jsou ovlivněny krátké mosty, na obrázku 9 při přejezdu potu v porovnání se statickými průhyby. Při přejezdu stochastické vozovky se neobjevuje žádný velký budící impuls a hodnoty průhybů se blíží statickým průhybům.



Obrázek 9: průhyby středů mostů 5-50 m při potu v porovnání se statickými průhyby.

6. Závěr

Model půlauta zpřesňuje chování soustavy most-čtvrtauto, závěry jsou shodné s prací [4]: semi-aktivní tlumič velmi snižuje lokální namáhání vozovky komunikace, nejlépe pro překážku typu bump, dále pro pot a stochastickou vozovku. Při přejezdu bumpu se velmi utlumí další výchylky dynamické kontaktní síly. To platí i pro dvě nezávisle na sobě řízené nápravy, kde větší úlohu hraje náprava více zatížená, tj. zadní.

Trámový most 2D malých rozpětí (10 m) dobře vystihuje chování deskové mostní konstrukce. Srovnání s deskovým modelem ukazuje chybu v průhybech max. 15 % na celé délce mostu pod nápravou. Dynamická kontaktní síla prakticky nezávisí na zvoleném modelu mostu a je podobná i tuhé vozovce při přejezdu stejné překážky a stejném řízení tlumiče. Vlastní frekvence vozidla leží výše než první vlastní frekvence mostů rozpětí 5-50 m a odezva mostu nemá charakter resonance.

Největší změny průhybů středů mostů v závislosti na přejeté překážce jsou na mostech malých rozpětí, stochastická vozovka vybužuje most nejméně z uvažovaných překážek. Průměrná redukce maximálních průhybů mostů pro semi-aktivní tlumič oproti pasivnímu je pro stochastickou vozovku o 2,5 %, pro bump o 3,6 %. Půlauto se semi-aktivními tlumiči mostní konstrukci neškodí a významně snižuje lokální namáhání vozovky při přejezdu nerovností.

7. Poděkování

Príspevek vznikl za podpory MŠMT v rámci výzkumného záměru **MSM 210000003**.

8. Literatura

- [1] Chen Y. *et al.*: Smart Suspension Systems for Bridge-Friendly Vehicles. Proc. of 9th SPIE Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, 2002.

- [2] Máca, J. Valášek, M.: Dynamic interaction of trucks and bridges. *Advanced Engineering Design*, Prague, 2003.
- [3] Šika, Z., Steinbauer, P., Valášek, M.: Hodnocení výsledků a testování s modelem půlauta na mostě. Interní dokument, ČVUT fakulta strojní, Praha, 2003.
- [4] Šmilauer, V., Máca J.: Dynamic Interaction of Bridge and Truck with Semi-active Suspension. *Engineering Mechanics 2003*, Svratka, Czech Republic, 2003.