

SIMULACE AKTIVNĚ ŘÍZENÝCH ŽELEZNIČNÍCH DVOJKOLÍ S VYUŽITÍM PROPOJENÍ SOFTWARE SIMPACK A MATLAB-SIMULINK

Jan Kalivoda*

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní

Abstrakt

Článek se zabývá postupy pro sestavení modelu kolejového vozidla s aktivně řízenými prvky ve vedení dvojkolí. Definuje požadavky na simulační model, model pro syntézu regulátoru a software použitý pro sestavení modelů a simulaci. Software SIMPACK je použit pro model mechanické části vozidla, MATLAB-Simulink pro model řídicích struktur. Výsledný simulační model vzniká propojením těchto dvou částí. Zvolená metoda je prezentována na modelu volného železničního dvojkolí.

1 Úvod

Po mnoho let byla konstrukce kolejových vozidel ve svém principu převážně strojní inženýrství. Samozřejmě elektroinženýři hráli také významnou roli, zejména v konstrukci elektrických trakčních pohonů, kde postupně rostl i podíl elektroniky a řízení, ale konstrukce kolejových vozidel jako celku byla vždy doménou strojních inženýrů.

S příchodem vlaků s naklápěcími skříněmi se tato situace začíná měnit. Naklápění skříní těchto vozidel je aktivně řízeno pomocí senzorů, sběrnic, procesorů a akčních členů. Za této situace musí být konstrukce kolejového vozidla od samého počátku založena na spolupráci strojních inženýrů se specialisty z oblasti řízení, regulace a software.

Nicméně kromě naklápěcích skříní najdeme v rámci konstrukce kolejových vozidel ještě minimálně dvě další oblasti, kde elektronika a řízení budou nacházet stále širší uplatnění: aktivní druhotné vypružení pro zvýšení komfortu cestujících a aktivní primární vypružení a vedení dvojkolí nabízející zlepšení stability, zvýšení kritické rychlosti vozidla a snížení opotřebení kol a kolejnic při průjezdu obloukem. Narozdíl od naklápění skříní které pracuje v oblasti relativně nízkých frekvencí s poměrně jednoduchými řídicími strukturami, je pro další dvě výše zmíněné oblasti takřka nevyhnutelné použití komplexních regulátorů a pokročilých řídicích struktur [1]. Výzkum v této oblasti se odehrává v rovině matematických simulací, zkoušek na modelových zařízeních [7] a ojedinelých experimentech na zkušebních vozidlech.

Projekt **Aktivní řízení podvozků kolejových vozidel s volnými koly** se zaměřuje na použití aktivně řízených prvků ve vedení dvojkolí. Ve své první fázi si klade za cíl vytvoření matematických modelů dvounápravových podvozků kolejových vozidel s různým uspořádáním senzorů, akčních členů a řídicích struktur a jejich porovnání. Ve druhé fázi se počítá s realizací zvoleného uspořádání na mechanickém modelu dvounápravového podvozku [2] [3]. Tento článek popisuje zvolenou metodu pro sestavení matematického modelu kolejového vozidla s aktivně řízeným primárním vypružením a vedením dvojkolí.

* Ing. Jan Kalivoda Ph.D.

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 166 07 Praha 6, Technická 4
Tel.: +420-22435-2493, E-mail: Jan.Kalivoda@fs.cvut.cz

2 Požadavky na model

Konvenční vypružení a vedení dvojkolí je zpravidla navrhováno s co možná nejpřesnějším modelem vozidla tak, aby simulace vykazovala co nejlepší shodu se skutečným vozidlem v reálné trati. Konstruktor pak pomocí tohoto modelu ladí charakteristiky komponentů vypružení až dosáhne požadovaného chování vozidla. Při návrhu aktivního vypružení je důležité rozlišit model pro návrh řídicí struktury a model pro simulace. Aby bylo možné použít standardní metody pro syntézu regulátoru je důležité mít vhodně zjednodušený model. Takový model by měl být lineární a zároveň zachovávající požadované vstupy a výstupy a dynamické vlastnosti podstatné pro navrhovaný regulátor. Naproti tomu pro simulace je obdobně jako u konvenčního vypružení třeba použít co nejpřesnější komplexní nelineární model.

3 Prostředky pro sestavení simulačního modelu

Je důležité aby použitý software umožnil integraci řídicích struktur a mechanického modelu. Jako zdánlivě nejsnazší cesta se jeví použití komplexního softwarového produktu od jednoho výrobce. V souladu s tímto předpokladem bylo prvotním záměrem vytvořit matematický model výhradně s využitím produktů MATLAB a MATLAB-Simulink. Pro model mechanické části se uvažovalo s využitím nástrojů pro modelování fyzikálních soustav, zejména SimMechanics a SimDriveline, řízení navrhnout s využitím MATLAB Control System Toolboxu a realizovat v prostředí MATLAB-Simulink. Vzhledem ke specifickým dílčím úlohám, které je potřeba zvládnout při sestavování modelu kolejového vozidla (zejména geometrické a silové definování kontaktu kolo-kolejnice) se pro sestavení modelu mechanické části vozidla jako podstatně efektivnější jeví použití specializovaného MBS softwaru. Ten ale zároveň musí umožnit integraci řídicích struktur realizovaných v prostředí MATLAB-Simulink. Možností takového spojení MBS modelu s modelem řízení je více:

1. Model řízení sestavit na základě zjednodušeného modelu mechanické části, vyexportovat ho ve vhodném formátu a integrovat do komplexního simulačního MBS modelu.
2. Vytvořit komplexní MBS model mechanické části, vyexportovat ho v podobě lineárního stavového modelu. Ten použít pro syntézu regulátoru a pro simulaci v prostředí MATLAB-Simulink.
3. Propojení MBS softwaru s MATLAB-Simulink a souběžná simulace.

Možnosti 1. a 2. předpokládají export části modelu vytvořené v jednom softwaru a jeho importování do druhé části modelu. Tento proces s sebou nese nutná zjednodušení a zkrácení.

Jako nejvýhodnější se pro sestavení co nejpřesnějšího simulačního modelu jeví souběžná simulace (možnost 3). Hlavním přínosem možnosti 2. je získání zjednodušeného lineárního modelu pro syntézu regulátoru.

Z výše zmiňovaných důvodů byl pro sestavení mechanické části simulačního modelu kolejového vozidla s aktivním řízením ve vedení dvojkolí zvolen produkt SIMPACK [4] a MATLAB-Simulink pro syntézu regulátoru a sestavení modelu řídicích struktur.

SIMPACK mimo jiné umožňuje:

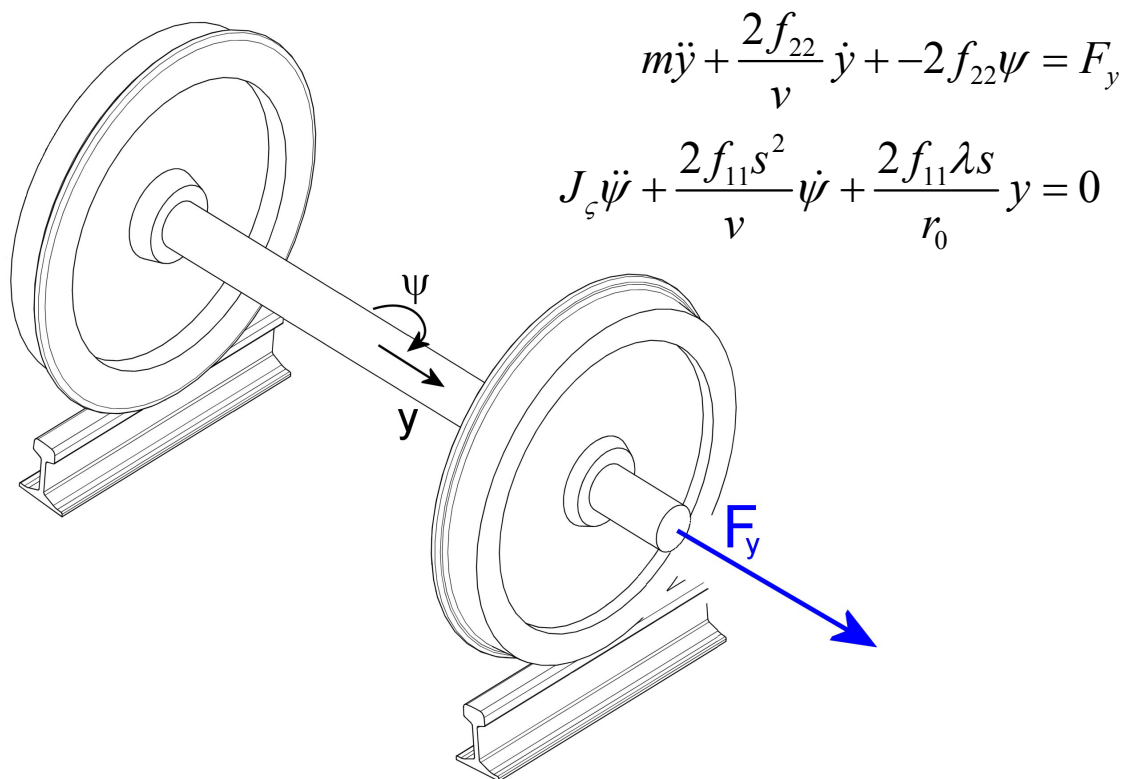
- Rychle a komfortně sestavit MBS model kolejového vozidla respektující specifika kontaktu kolo-kolejnice.
- Sestavený MBS model zlinearizovat a vyexportovat.
- Pomocí rozhraní SIMAT propojit MBS model s modelem řízení sestaveným v prostředí MATLAB-Simulink a současnou simulaci obou modelů. Tímto propojením vznikne výsledný komplexní simulační model.

4 Model pro syntézu regulátoru

Výsledný simulační model vzniklý propojením MBS modelu a modelu řídicích struktur se vzhledem ke své nelinearitě a komplexnosti nehodí pro syntézu regulátoru. Model pro syntézu regulátoru je v zásadě možné vytvořit dvěma způsoby:

- Fyzikální zjednodušení modelu
- Analytické zjednodušení modelu

4.1 Fyzikální zjednodušení modelu



Obr. 1 Zjednodušený model dvojkolí a jeho matematický popis

Fyzikální zjednodušení modelu je založeno na vytvoření zjednodušeného modelu s menším počtem stupňů volnosti oproti simulačnímu modelu. Toho lze docílit například zanedbáním vazby svislé a příčné dynamiky a vozidlo z hlediska návrhu primárního vypružení a vedení dvojkolí nahradit jeho rovinným modelem. Model pro syntézu regulátoru pak vznikne a vyjádřením rovnic rovnováhy takto zjednodušeného modelu.

4.2 Analytické zjednodušení modelu

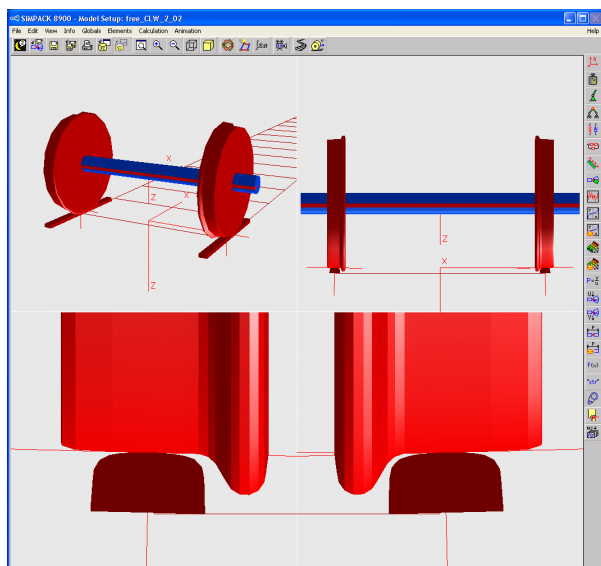
Analytické zjednodušení modelu spočívá v linearizaci komplexního simulačního modelu. Takto získaný lineární model je teoreticky možné použít pro syntézu regulátoru pomocí standardních metod.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x, u) &\Rightarrow &\dot{x} = \mathbf{A}x + \mathbf{B}u && x \dots \text{vektor stavových veličin} \\ y &= y(x, u) &\Rightarrow &y = \mathbf{C}x + \mathbf{D}u && y \dots \text{vektor výstupních veličin} \\ &&&&& u \dots \text{vektor buzení}\end{aligned}$$

V případě modelu celého vozidla s několika desítkami stupňů volnosti získáme velmi složitý a

prakticky nepoužitelný regulátor, který na svém vstupu bude požadovat značné množství obtížně měřitelných veličin. Pro návrh regulátoru je model vzniklý linearizací simulačního modelu nutné vhodnou metodou zredukovat na model s menším počtem stupňů volnosti. Redukovaný model musí zachovat požadované vstupy a výstupy a musí dobře aproximovat pro návrh kontroléru důležité dynamické vlastnosti neredukovaného modelu. Vhodné metody redukce s odkazy na další literaturu jsou popsány v [5].

5 Aplikace na model volného železničního dvojkolí



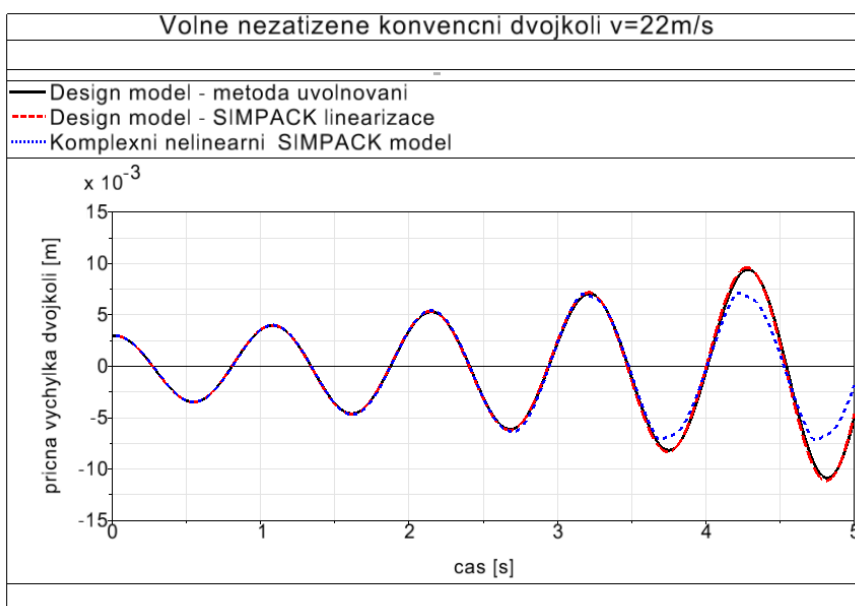
Obr. 2 model konvenčního dvojkolí v prostředí softwaru Simpack

Konvenční železniční dvojkolí se skládá z tuhé nápravy a dvou na ní nalisovaných kol. Toto pevné spojení obou kol dvojkolí přináší výhodu v přirozeném centrování dvojkolí v ose koleje a stavění do radiální polohy v obloucích. Na druhé straně je zdrojem příčných oscilací označovaných jako vlnivý pohyb. S rostoucí rychlostí jízdy vozidla se vlnivý pohyb stává nestabilním, amplituda příčných kmitů dvojkolí narůstá. To může vést až k poškození částí pojezdu vozidla, poškození koleje, nebo k vykolejení vozidla. Ke stabilizaci vlnivého pohybu se u konvenčních kolejových vozidel používají pasivní pružiny a hydraulické tlumiče, které ale současně brání radiálnímu stavění dvojkolí v obloucích. Tím zvyšují opotřebení kol a kolejnic zejména v obloucích malých poloměrů. Konstrukce vozidla s konvenčními dvojkolími je tedy vždy obtížným kompromisem mezi maximální rychlostí a vlastnostmi z hlediska průjezdu obloukem.

V následující ukázce bude dvojkolí namísto pasivních silových prvků stabilizováno pomocí příčné síly F_y jejíž velikost bude aktivně řízena.

5.1 Pasivní model

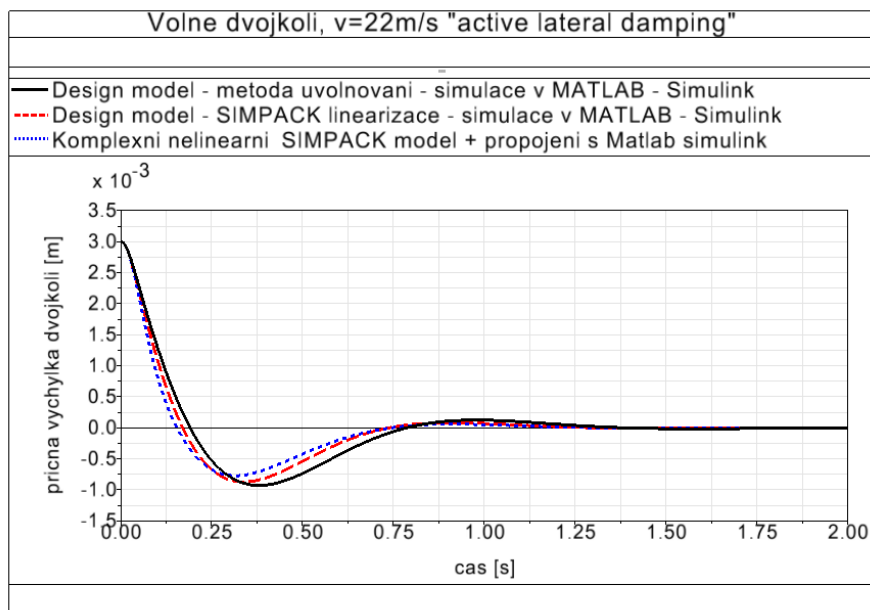
Obrázek Obr. 3 popisuje odezvu pasivního modelu dvojkolí na počáteční příčnou výchylku 3mm vzhledem k ose koleje. Porovnává řešení nelineárního modelu sestaveného v programu SIMPACK s lineárními modely určenými primárně pro syntézu regulátoru. První lineární model byl odvozen pomocí fyzikálního zjednodušení a odvození pohybových rovnic (viz kapitola 4.1), druhý vznikl linearizací SIMPACK modelu (viz kapitola 4.2). Simulace potvrzuje nestabilní nárůst amplitud



Obr. 3 Odezva na počáteční příčnou výchylku pasivního modelu dvojkolí

příčných kmitů. Všechny modely vykazují dobrou shodu. Maximální velikost amplitudy příčných kmitů je u nelineárního modelu omezena okolky, kdežto u lineárních modelů neustále narůstá.

5.2 Řízení metodou Active lateral damping



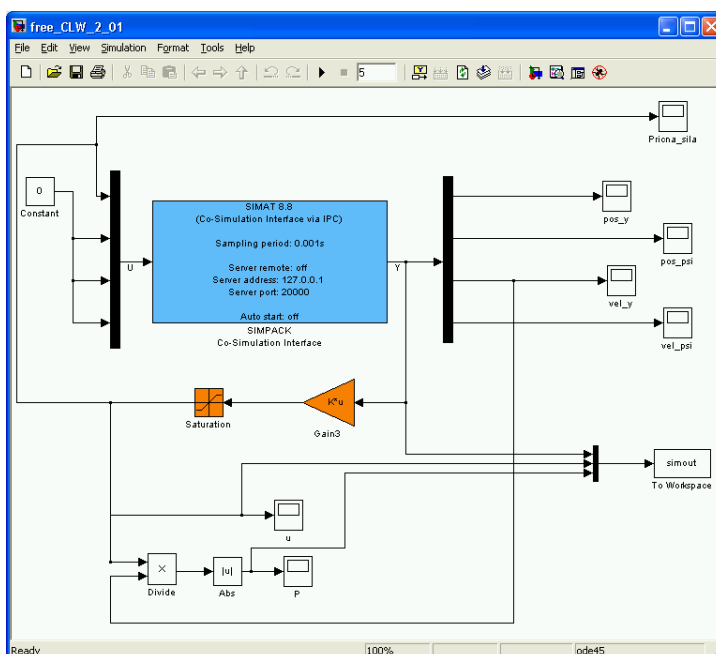
V první fázi byla pro aktivní stabilizaci příčných kmitů dvojkolí zvolena jednoduchá metoda zvaná „Active lateral damping“ [6]. Příčná síla F_y je přímo úměrná rychlosti natáčení dvojkolí kolem svislé osy ψ . Výsledek simulace (viz Obr. 4) potvrzuje velmi dobrou účinnost této metody stabilizace, příčná výchylka dvojkolí vymizí v čase menším než 2s. Výsledky jsou obdobné pro všechny tři uvažované modely.

Obr. 4 Odezva na počáteční příčnou výchylku dvojkolí při aktivní stabilizaci metodou „Active lateral damping“.

5.3 Návrh stavového regulátoru

Na rozdíl od výše použité metody, kdy velikost řízené síly byla závislá pouze na rychlosti natáčení dvojkolí kolem svislé osy ψ , využívá stavový regulátor pro výpočet akční veličiny všechny stavové veličiny soustavy. Pro návrh stavového regulátoru byl použit model dvojkolí získaný linearizací SIMPACK modelu. Obrázek Obr. 5 ukazuje regulační schéma vytvořené v MATLAB-Simulink, světle modrý blok představuje komplexní nelineární model mechanické části vytvořené v SIMPACKu.

Stavový regulátor byl navržen dvěma metodami: metodou zadání pólů a metodou LQR. K syntéze regulátoru byl využit MATLAB Control System Toolbox, zejména funkce *ctrb* a *obsv* pro ověření říditelnosti a pozorovatelnosti systému a funkce *acker*, *place*, *lqr* pro návrh regulátorů.

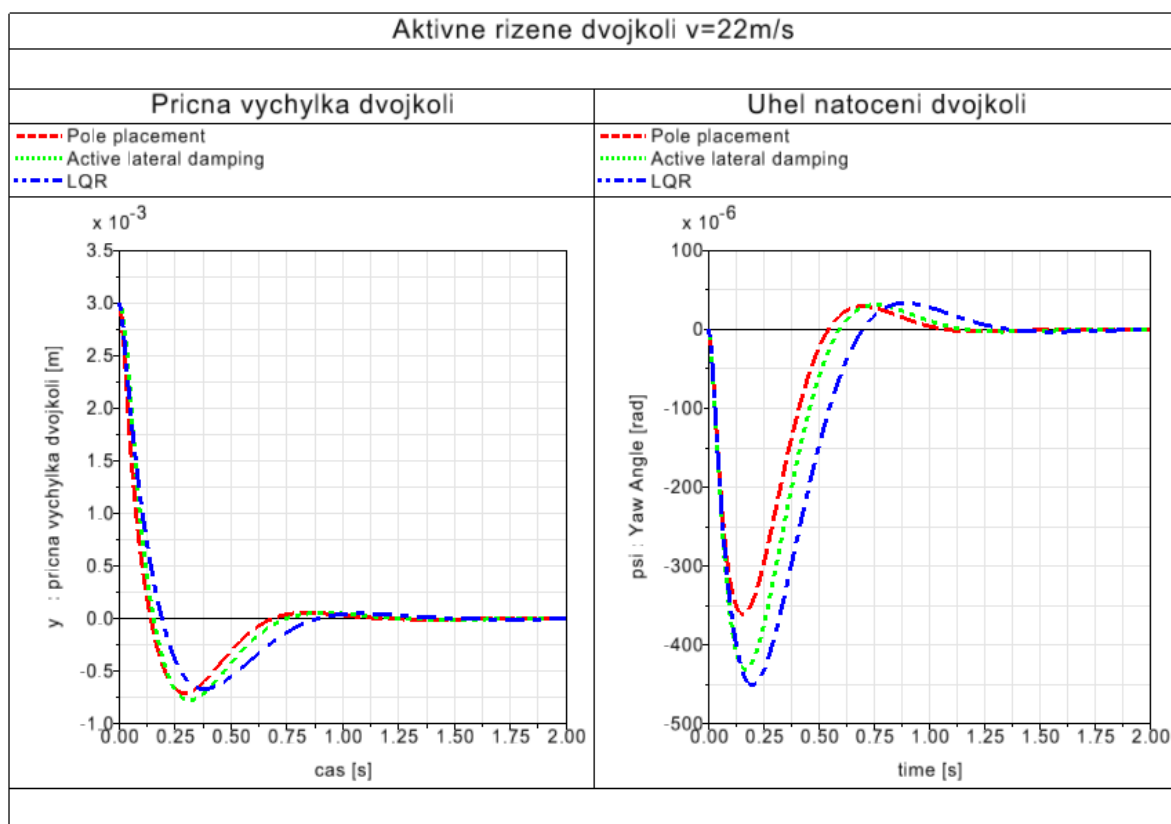


Obr. 5 Regulační obvod se stavovým regulátorem

5.4 Porovnání regulátorů

Jakost regulace aktivního řízení primárního vypružení a vedení dvojkolí kolejového vozidla lze posuzovat z mnoha hledisek. Mezi nejdůležitější patří:

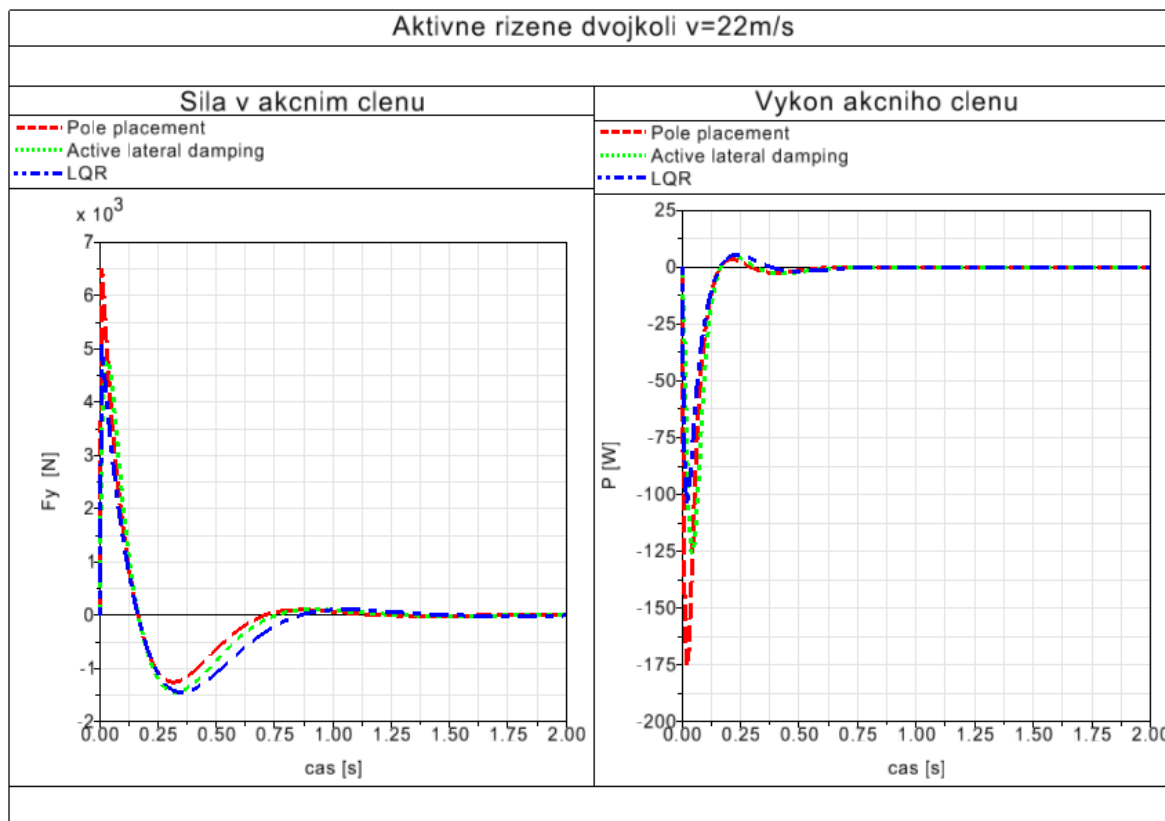
- maximální velikost příčné výchylky dvojkolí
- maximální velikost úhlu natočení dvojkolí
- maximální velikost příčné síly mezi dvojkolím a tratí
- míra opotřebení oběžných ploch kol
- maximální velikost síly a výkonu akčního členu
- robustnost, malá závislost kvality regulace na změně parametrů vozidla, koleje a prostředí



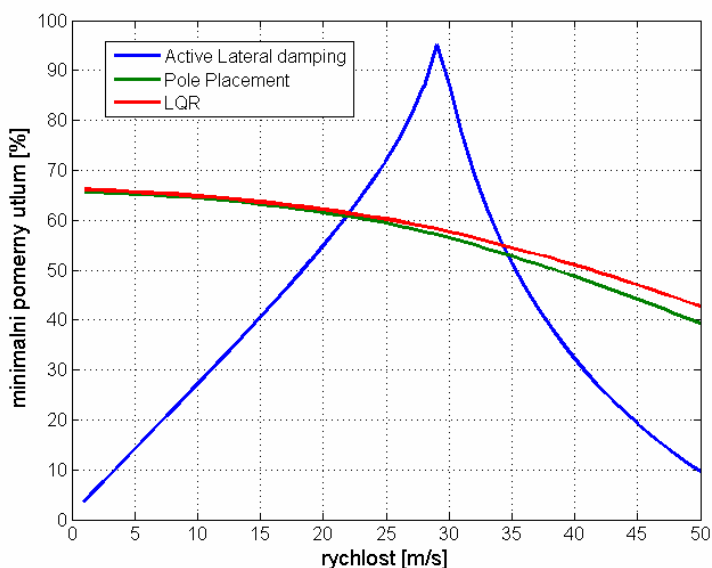
Obr. 6 Průběh příčné výchylky a úhlu natočení pro různé typy regulátorů

Z obrázku Obr. 6 je zřejmé že všechny tři porovnávané regulátory vykazují přibližně stejnou velikost maximální příčné výchylky dvojkolí. Z hlediska maximální velikosti úhlu natočení se jeví jako nejlepší regulátor navržený metodou zadání pólů, zatímco regulátor navržený metodou LQR vykazuje nejvyšší maximální hodnotu úhlu natočení dvojkolí.

Z porovnání energetických a silových nároků regulátorů (Obr. 7) vychází nejlépe regulátor navržený metodou LQR, který vykazuje o cca 25% menší maximální hodnotu síly a o 43% menší hodnotu špičkového výkonu akčního členu v porovnání s regulátorem navrženým metodou „Active lateral damping“. Z porovnání absolutních hodnot sil a výkonů je zřejmé, že ke stabilizaci dvojkolí postačí aktuátor s relativně malým výkonem 100-200W, ale musí být schopen vyvinout značnou sílu ~6000N.



Obr. 7 Průběh síly a výkonu akčního členu pro různé typy regulátorů



Obr. 8 Minimální hodnota poměrného útlumu v závislosti na rychlosti jízdy

útlumu 60% při rychlosti 22 m/s. Změnu minimální hodnoty poměrného útlumu v závislosti na rychlosti jízdy ukazuje Obr. 8. Zatímco regulátory využívající ke zpětné vazbě všechny stavové veličiny vykazují ve velkém rozsahu rychlostí obdobné vlastnosti, soustava s regulátorem navrženým metodou „Active lateral damping“ vykazuje nízké hodnoty útlumu v malých a vysokých rychlostech

Zřejmě nejpodstatnější jsou mezi uvažovanými regulátory rozdíly v jejich robustnosti. Během provozu se vlivem opotřebení, hmotnosti a rozmístění nákladu či cestujících, počasí a dalších vlivů mění ve značném rozsahu parametry vozidla a koleje. Regulátor je třeba navrhnout tak, aby pracoval spolehlivě v celém rozsahu předpokládaných možných změn těchto parametrů, případně aby se jeho konstanty těmto změnám adaptivně přizpůsobovaly.

Všechny tři porovnávané regulátory byly navrhovány pro dosažení minimální hodnoty poměrného

(pouze 5 až 10%). Současně je soustava s tímto regulátorem přetlumena v oblasti rychlostí kolem 30m/s kde se minimální hodnota útlumu blíží 100% při kterých soustava přestává kmitat.

6 Závěr

Článek diskutuje problémy spojené se sestavením se modelu kolejového vozidla s aktivně řízeným primárním vypružením. Definuje požadavky na simulační model a na model pro syntézu kontroléru. Popisuje metodu založenou na využití softwaru SIMPACK a MATLAB-Simulink a ukazuje její aplikaci na modelu volného konvenčního železničního dvojkolí.

Cílem je použít výše popsaný postup na sestavení modelů dvounápravových podvozků s konvenčními dvojkolími a dvojkolími s volnými koly s rozdílnými regulačními strukturami. Jednotlivé varianty porovnat a jednu z nich realizovat na kladkovém zkušebním stendu.

Tento příspěvek vznikl za podpory grantu GAČR 101/08/P174 Aktivní řízení podvozků kolejových vozidel s volnými koly.

Literatura

- [1] R. M. GOODALL, W. KORTUM, *Mechatronic Development for Railway Vehicles of the Future*, Control Engineering Practice, October 2002, str. 887-898
- [2] P. BAUER, J. KALIVODA, *Experimentální výzkum dvojkolí s volnými koly*, PRORAIL 2007, sborník přednášek str. 48-61.
- [3] ŠÍBA J., KOLÁŘ J.: *Stend pro modelové zkoušky jízdních vlastností kolejových vozidel*, Současné problémy v kolejových vozidlech, (1997), UP Pardubice , sborník přednášek str. 225 -234, ISBN 80-7194-105-0.
- [4] www.simpack.de
- [5] A. C. ZOLOTAS, J. T. PEARSON, R. M. GOODALL, *Modelling Requirements for the Design of Active Stability Control Strategies for a High Speed Bogie*. Multibody System Dynamics, vol 15, 2006, str.. 51-66.
- [6] J. T. PEARSON, R. M. GOODALL, T. X. MEI, G. HIMMELSTEIN, *Active stability control strategies for a high speed bogie*, Control Engineering Practice, vol. 12, 2004, str. 1381-1391
- [7] GRETZSCHEL M., JASCHINSKI A., *Design of an Active Wheelset on a Scaled Roller Rig*, Vehicle System Dynamics 2004, Vol.41, No.5, str.365-381