

SIMULACE AKTIVNÍCH PRVKŮ V PODVOZCÍCH KOLEJOVÝCH VOZIDEL

*J. Kalivoda**

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní

Abstrakt

Výhody aktivních prvků ve vypružení dopravních prostředků jsou všeobecně známy. S jejich pomocí lze z hlediska dynamiky jízdy, komfortu či bezpečnosti dosáhnout takových vlastností, které jsou pomocí čistě pasivních řešení nedosažitelné. Narozdíl od automobilů a letadel se na kolejových vozidlech prosazují aktivní prvky pouze v některých dílčích subsystémech. Článek se zabývá možnostmi využití aktivních prvků v podvozcích kolejových vozidel, sestavením simulačního modelu kolejového vozidla s aktivními prvky ve vedení dvojkolí a ověřením výsledků simulací na kladkovém stendu.

1 ÚVOD

Vliv elektroniky a řízení na dynamiku jízdy kolejového vozidla je u běžně provozovaných vozidel prakticky omezen pouze na vozidla s naklápěcími skříněmi. Oproti tomu u letadel či automobilů má elektronika podstatně větší vliv na základní funkční vlastnosti. Prakticky každé současné vojenské i dopravní letadlo disponuje technologií „fly-by-wire“ plně ovládající dynamiku letu, automobily jsou naprosto běžně vybaveny stabilizačními, antiblokovacími a asistenčními elektronickými systémy. Tento technologický náskok můžeme přisuzovat vyšším životnostem a pomalejší obměnou kolejových vozidel v porovnání s automobily nebo letadly. S velkou pravděpodobností lze předpokládat že vliv elektroniky a řízení bude i u kolejových vozidel narůstat a že začne zasahovat i do systémů přímo ovlivňujících dynamiku jízdy a vzájemné působení mezi vozidlem a tratí.

Využití aktivních prvků přímo ovlivňujících základní dynamické vlastnosti kolejových vozidel lze předpokládat v následujících oblastech: [6]

1.1 Aktivní prvky v sekundárním vypružení

Sekundární vypružení výrazně ovlivňuje dynamické vlastnosti vozidla z hlediska vjemů cestujících. Aktivní prvky v sekundárním vypružení mohou být tedy použity zejména k vylepšení vlastností vozidla z hlediska komfortu pro cestující. Obecně mohou být použity v libovolném směru z hlediska stupňů volnosti sekundárního vypružení, prakticky lze jejich využití najít zejména ve svislém a příčném směru a naklápění skříně.

1.1.1 Vozidla s naklápěcími skříněmi

Vozidla s naklápěcími skříněmi využívají skutečnosti, že rychlost vozidla při průjezdu obloukem je prakticky omezena komfortem cestujících vyjádřeným maximální dovolenou hodnotou na ně působícího příčného zrychlení. Rychlost jízdy tedy není omezena příčnými silami mezi koly vozidla a kolejnicemi nebo rizikem převrácení vozidla, ačkoli ani tato omezení nelze zanedbat. Naklápění skříně v obloucích koleje snižuje úroveň příčného zrychlení působícího na cestující, čímž je umožněna vyšší provozní rychlost vozidla v obloucích.

Naklápění skříně je v současné době dobře zvládnutá technologie s mnoha úspěšnými konstrukčními řešeními a aplikacemi v běžném provozu.

* Ing. Jan Kalivoda, Ph.D.; České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel, Technická 4, Praha 6, Jan.Kalivoda@fs.cvut.cz

1.1.2 Aktivní sekundární vypružení

Na rozdíl od naklápění skříně vozidla, které reaguje na jednoznačně dané parametry trati (poloměr oblouku, převýšení koleje a průběh jejich změn), aktivní sekundární vypružení musí reagovat na buzení náhodnými nerovnostmi trati.

Existuje celá řada možných konfigurací plně aktivního sekundárního vypružení ve svislém nebo příčném směru. Aktivní prvky mohou buď zcela nahradit pasivní součásti sekundárního vypružení, případně pracovat paralelně s pasivními prvky. Jako výhodnější se jeví druhá možnost kdy velikost aktivního prvku může být výrazně redukována, protože pasivní prvky zajišťují konstantní silové působení nutné k nesení skříně ve svislém směru a kvazistatické síly v příčném směru při průjezdu obloukem.

Studie zabývající se aktivními prvky v sekundárním vypružení většinou vycházejí z všeobecně dobře známého „sky-hook“ principu. Ačkoli koncept plně aktivního sekundárního vypružení je v současné době teoreticky i technologicky velmi dobře zvládnut, je jeho využití v běžném provozu velmi omezené. Vzhledem k tomu, že komfort jízdy je u současných vozidel všeobecně považován za dostatečně dobrý, lze pro aktivní sekundární vypružení obtížně hledat ekonomické odůvodnění. Možnost provozovat vozidla s aktivním sekundárním vypružením na tratích s nízkou kvalitou svršku, při stejném komfortu který pasivní vozidla dosáhnou pouze na dobře udržovaných tratích, je do značné míry pouze teoretická. Železniční infrastruktura směřuje spíše k co nejlépe udržovaným tratím.

1.2 Aktivní prvky v primárním vypružení

Zatímco aktivní prvky v sekundárním vypružení ovlivňují zejména komfort jízdy z pohledu cestujících, použití aktivních prvků v primárním vypružení nabízí především ovlivnění chodových vlastností vozidla a sil mezi koly a kolejnicemi. Využití aktivních prvků v primárním vypružení nabízí větší možnosti ovlivnění vlastností vozidla v porovnání s naklápěním skříně a aktivním sekundárním vypružením. Zároveň existuje podstatně širší škála možností a přístupů:

1.2.1 Aktivně řízená konvenční dvojkolí

Využití aktivních prvků působících na konvenční dvojkolí lze spatřovat především ve zlepšení stability, zlepšení vlastností z hlediska průjezdu obloukem, případně kombinace obou těchto přínosů současně. Studie se také zaměřují na náhradu čtyřnápravových podvozkových vozů mechanicky jednoduššími a méně hmotnými dvounápravovými vozy s aktivními prvky. Tyto mohou při stejných či vyšších rychlostech nabídnout vyšší úroveň komfortu a minimalizované silové působení mezi koly a kolejnicemi. Principiálně existují dvě základní schémata rozmístění aktivních prvků:

- a) Aktivní prvky působí příčnou silou na dvojkolí.
- b) Aktivní prvky které vyvozují moment působící na dvojkolí kolem jeho svislé osy. K tomu může být použit:
 - i. rotační akční prvek,
 - ii. dvojice posuvných akčních prvků.

Dle výsledků prezentovaných v [[5]] se možnost b) jeví jako výhodnější, protože při stejné úrovni stability vykazuje nižší úroveň sil přenášených na skříně a tedy nižší úroveň zrychlení skříně v porovnání s variantou a). Variantu b I.) lze kromě zlepšení stability využít i k optimalizaci průjezdu obloukem – radiální stavění dvojkolí.

1.2.2 Aktivně řízená dvojkolí s nezávisle otočnými koly

U dvojkolí s nezávisle otočnými koly je vzhledem k jejich velmi dobré stabilitě hlavním cílem využití aktivních prvků zlepšení vodících vlastností. Z hlediska možnosti rozmístění akčních prvků je možné využít všechny možnosti uvedené v odstavci 1.2.1. U trakčních vozidel je navíc je možné nezávisle řídit trakční moment působící na jednotlivá kola.

1.2.3 Aktivně natáčená kola

Koncept nahrazující dvojkolí dvojicí kol natáčených kolem svislé osy obdobně jako u přední nápravy automobilu. Rovnoběžnost kol je zajištěna pomocí spojovací tyče na kterou silově působí akční člen.

1.2.4 Aktivně řízené natáčení podvozků

Ačkoli výše zmíněné principy nabízejí značný efekt, jejich praktické využití je komplikované jak z technických hledisek, tak z hlediska náročného vývoje a sním spojených nákladů. Praktickým kompromisem může být náhrada tlumičů vrcení aktivně řízenými prvky. Princip je uveden v této sekci přestože jejich působení je na úrovni sekundárního vypružení. Použití této metody je totiž zaměřeno zejména na ovlivnění základní dynamiky vozidla, nikoli na zlepšení komfortu pro cestující.

2 VOLBA USPOŘÁDÁNÍ AKČNÍCH ČLENŮ

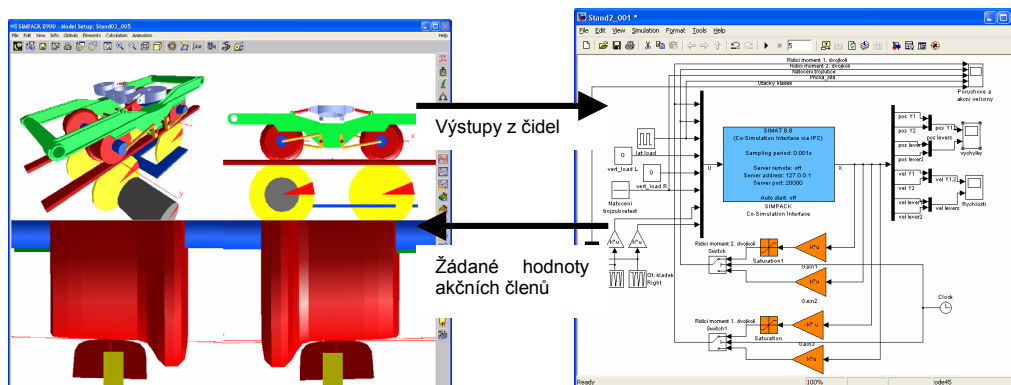
Z výše uvedeného výčtu je zřejmé, že existuje značné množství variant uspořádání akčních členů. Dále se jednotlivé varianty mohou lišit typem, počtem a umístěním senzorů a řídicími strukturami. Při volbě uspořádání byl kladen mimo jiné zřetel i na obtížnost realizace jednotlivých variant na skutečném vozidle a na kladkovém standu ČVUT [[1]], [[2]]. Byla tedy hledána taková varianta, která je implementovatelná i do současných konstrukcí vozidel bez dramatických konstrukčních změn. Z těchto důvodů byla zamítnuta varianta 1.2.3 která předpokládá konstrukci zcela nových podvozků nebo dvounápravových vozidel. Cílem projektu je zejména ovlivnění základních dynamických vlastností vozidla. Proto se od počátku předpokládalo použití aktivních prvků v primárním vypružení a na současných vozidlech nejsnáze realizovatelná varianta 1.2.4 nebyla uvažována. Zbývají tedy prakticky 3 možnosti:

- aktivní prvky vyvozující moment působící na dvojkolí kolem svislé osy,
- aktivní prvky působící příčnou silou na dvojkolí,
- aktivní prvky vyvozující trakční moment na jednotlivá volná kola.

I když řídicí moment je možné na volná kola vyvozovat i pomocí aktivně řízených brzd vozidla, je možnost c) prakticky vhodná pouze pro trakční vozidla. Možnost b) lze použít zejména pro stabilizaci konvenčních dvojkolí, ale pouze za cenu částečného snížení komfortu pro cestující [[5]]. Možnost a) je využitelná nejen pro stabilizaci konvenčních dvojkolí a zlepšení vodících vlastností dvojkolí s volnými koly, ale i pro radiální stavění dvojkolí v obloucích. Z hlediska univerzálnosti využití byla pro podrobnější posouzení zvolena možnost a) tedy akční členy působící momentem kolem svislé osy dvojkolí.

3 MATAMATICKÝ MODEL

Model mechanické části byl sestaven s využitím MBS softwaru SIMPACK. Řídicí struktury byly vytvořeny v prostředí MATLAB Simulink a výsledný simulační model pak vznikl propojením modelu mechanické části a řídicích struktur (Obr. 1).



Obr. 1 Simulační model – propojení modelu mechanické části a řídicích struktur

Syntéza regulátoru byla provedena na základě zlinearizovaného modelu mechanické části s využitím nástrojů softwarového produktu MATLAB a jeho Control System Toolboxu. Použitý postup sestavení modelu kolejového vozidla s aktivními prvky je podrobně popsán a na jednoduchém příkladu samostatného volného dvojkolí demonstrován v [[4]].

Rozměrové a hmotové charakteristiky matematického modelu odpovídají dvounápravovému podvozku ze zkušebního stendu. Výsledky simulací tedy ukazují předpokládané chování modelu podvozku v měřítku 1:3,5. Ke kvalitativně shodným výsledkům lze dojít i při simulacích s modelem jehož parametry odpovídají reálnému vozidlu.

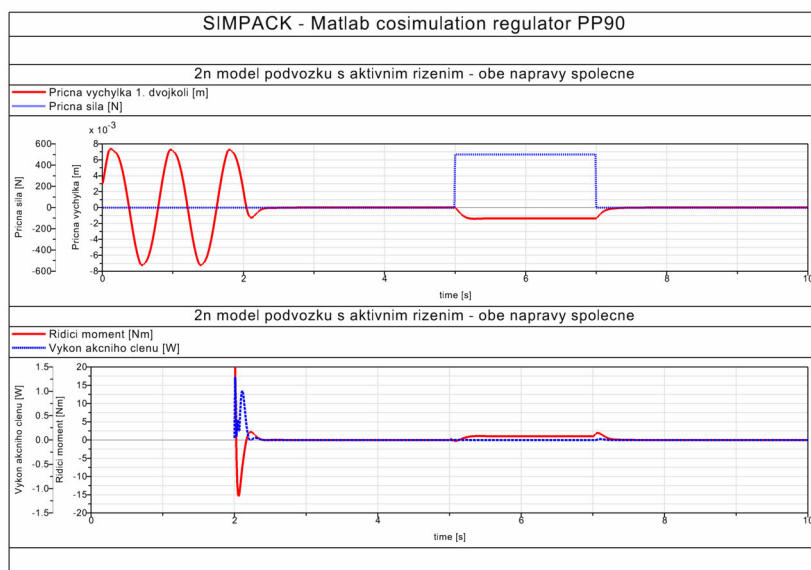
4 VÝSLEDKY SIMULACÍ

4.1 Stabilizace vlnivého pohybu dvounápravového podvozku

Příčné kmity dvojkolí, nazývané též vlnivý pohyb, jsou z principu neodstranitelnou vlastností kolejových vozidel s konvenčními dvojkolími s kuželovým nebo křivkovým profilem kola. Tedy až na několik výjimek všech provozovaných kolejových vozidel. Od určité rychlosti, které říkáme kritická rychlost, se stává vlnivý pohyb nestabilním a dochází k postupnému nárůstu amplitud příčných kmitů dvojkolí. Kritickou rychlostí je limitována maximální provozovaná rychlost kolejového vozidla. Ke zvyšování kritické rychlosti vozidla se využívá ladění tuhosti vypružení a pasivní tlumicí prvky. Kolejová vozidla určená pro provoz vyššími rychlostmi mají pak zpravidla velmi tuhé primární vypružení, které je příčinou zhoršení vlastností vozidla z hlediska průjezdu obloukem a opotřebení kolejnic v obloucích. Dále jsou zpravidla vybavena tlumiči vrcení, které jsou zdrojem přenosu vibrací z podvozku na skříň, jsou náročné na údržbu a nezanedbatelně zvyšují hmotnost podvozku. Návrh kolejového s konvenčními dvojkolími je tedy vždy složitým kompromisem mezi maximální rychlostí a vlastnostmi z hlediska průjezdu obloukem.

Použití aktivních prvků působících kolem svislé osy dvojkolí nabízí stabilizaci vozidla při jízdě vysokou rychlostí i možnost radiálního stavění dvojkolí v obloucích koleje. Můžeme tedy dosáhnout zvýšení kritické rychlosti a zároveň i podstatné zlepšení vlastností při průjezdu obloukem.

Dramatickou změnu základních dynamických vlastností dvounápravového podvozku které lze docílit pomocí aktivních prvků demonstruje Obr. 2. Podvozek je vybaven táhlovým mechanismem radiálního stavění dvojkolí, který je ovládán pomocí jednoho akčního členu – servomotoru. Regulátor byl navržen metodou zadání pólů (pole placement) [[7]] tak aby bylo dosaženo požadované velikosti relativního tlumení všech vlastních čísel. Vstupem regulátoru je 6 veličin (příčné výchylky obou dvojkolí, poloha mechanismu radiálního stavění náprav a jejich derivace) a na výstupu je požadovaný moment servomotoru ovládajícího natáčení dvojkolí. Cílem regulace je stabilizace obou dvojkolí podvozku v ose kolejového kanálu.



Obr. 2 Odezva na aktivní řízení

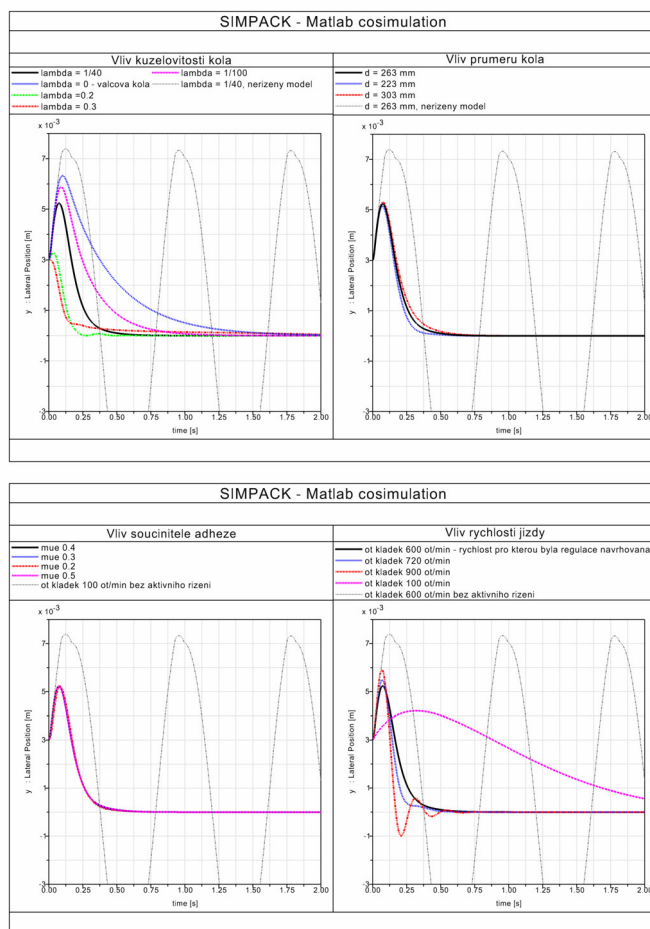
V čase 0 až 2 s je mechanismus radiálního stavění dvojkolí zablokovan. Na obrázku je vidět typické chování odpovídající jízdě nadkritickou rychlostí – amplitudy výchylek dvojkolí mají tendenci neustále narůstat a jsou omezeny pouze šířkou kolejového kanálu. Dochází k pravidelným dolehnutím okolků na hlavu kolejnice, které ve svém důsledku mohou vést poškozené trati, nosných struktur vozidla, vykolejení vozidla apod.

V čase 2s je uvedeno v činnost aktivní řízení radiálního stavění dvojkolí. Výchyly dvojkolí se prakticky okamžitě ustálí v ose kolejového kanálu. V čase 5s začíná na podvozek působit příčná síla o velikosti 500N. Podvozek reaguje ustálenou změnou příčné výchylky, která opět velmi rychle vymizí poté co příčná síla přestane na podvozek působit. Je tedy zřejmé, že navržené řídicí struktury velmi dobře stabilizují podvozek v ose koleje, ale nejsou schopny vyrovnat trvalé změny poruchových veličin. Navržený stavový regulátor je možné rozšířit o integrační složku [[7]] a docílit tím i kompenzace trvalých změn poruchových veličin jakou je například konstantní příčná síla vlivem bočního větru, či nerovnoměrně působící svislé zatížení. Zároveň je pomocí rozšířeného stavového regulátoru s integrační složkou možné i sledování žádaných hodnot příčných výchylek dvojkolí.

Průběh momentů servomotoru ovládajícího mechanismus radiálního stavění dvojkolí vykazuje špičku na hodnotě cca 20 Nm. Díky velmi malým natočením a nízkým úhlovým rychlostem jsou požadavky na výkon servomotoru velmi malé. Při této simulaci je špička výkonu akčního členu – servomotoru pouhých 1,25W.

4.2 Vliv parametrů na jakost regulace

Parametry vozidla i trati se v průběhu provozu mohou v poměrně velkém rozsahu měnit. Některé z těchto změn lze snadno měřit a pokud je to nezbytné parametry regulace těmito změnám přizpůsobit. Například změnu hmotnosti skříně vlivem změny počtu cestujících lze snadno určit měřením svislé deformace vypružení.



Obr. 3 Vliv změny parametrů na průběh regulace

Změnu jiných parametrů však podobně jednoduchým způsobem detekovat nelze. Například změna kuželovitosti vlivem opotřebení oběžných ploch kol, změna součinitele adheze vlivem aktuální klimatické situace a znečištění kolejnic apod. Regulaci je třeba navrhnout tak, aby požadovaných výsledků bylo dosaženo v co nejširším rozmezí neurčitých parametrů vozidla a trati.

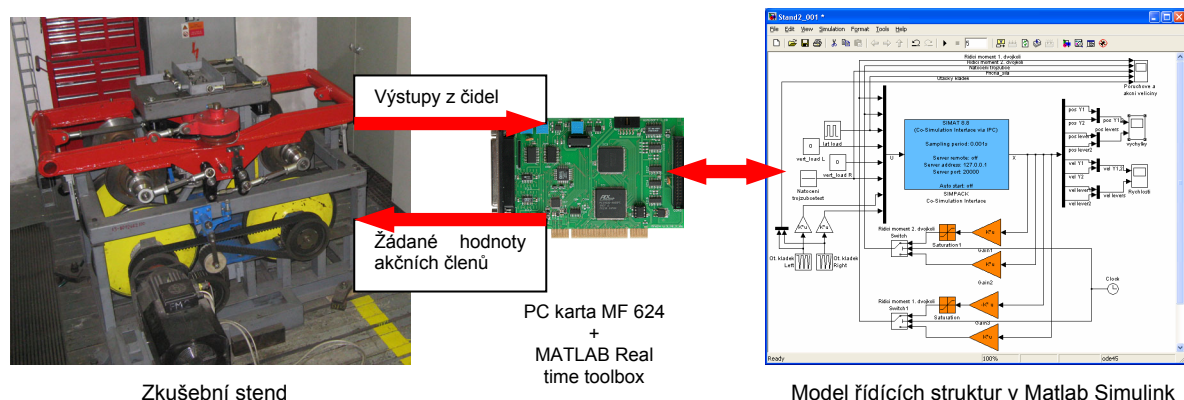
Na obrázku 3 jsou uvedeny průběhy odezev na počáteční příčnou výchylku prvního dvojkolí 3mm pro měnící se kuželovitost, průměr kola, rychlost jízdy a součinitel adheze. Defaultní hodnoty parametrů pro které byl regulátor byl navrhován jsou: kuželovitost 1:40, průměr kola 263mm, součinitel adheze 0.3 a rychlost 15,7m/s které odpovídají otáčky kladek stendu 600 ot/min. Pro porovnání je v grafech zobrazen i průběh odpovídající pasivnímu modelu s tuze vedenými nápravami.

Z uvedených grafů je zřejmé, že navržená řídicí struktura je vzhledem ke změnám těchto parametrů dostatečně robustní, neboť vždy bylo dosaženo cíle – ustálení dvojkolí v ose kolejového kanálu.

5 OVĚŘENÍ VÝSLEDKŮ SIMULACÍ NA ZKUŠEBNÍM KLADKOVÉM STENDU

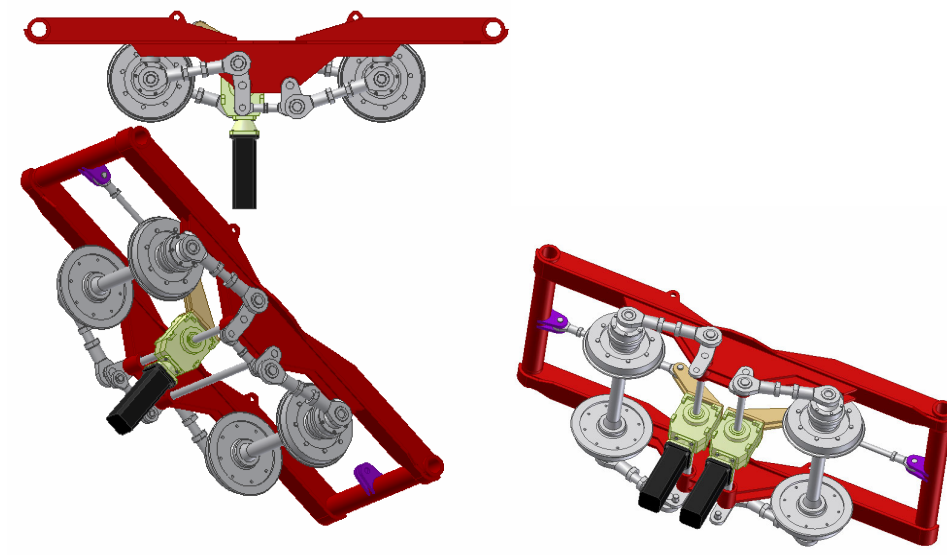
Výsledky simulací budou ověřovány na kladkovém stendu, který v laboratorních podmínkách umožňuje simulovat jízdu dvounápravového podvozku kolejového vozidla v koleji. Princip tohoto zařízení spočívá v upoutání zkoušeného dvounápravového podvozku, respektive jeho modelu v měřítku 1:3,5, v podélném směru vůči pevnému prostoru. Ve svislém směru je nesen otáčejícími se kladkami, které nahrazují kolej. Touto záměnou pohybového stavu vozidla a nosných kladek (koleje) je vytvořena situace, kdy relativní pohyb vozidla vůči koleji tvořené kladkami je analogický jeho pohybu a chování vůči prostoru koleje při skutečné jízdě.

Měřicí řetězec kladkového stendu byl proto v minulých letech změněn tak aby signály z čidel byly v reálném čase k dispozici v prostředí Matlab Simulink běžícím na řídicím PC. K tomu slouží měřicí karta MF624 a MATLAB Real Time Toolbox. Pouhou náhradou výstupů MBS modelu za výstupy z čidel na měřicím zařízení je možné rychle ověřit výsledky počítačových simulací – Obr. 4.



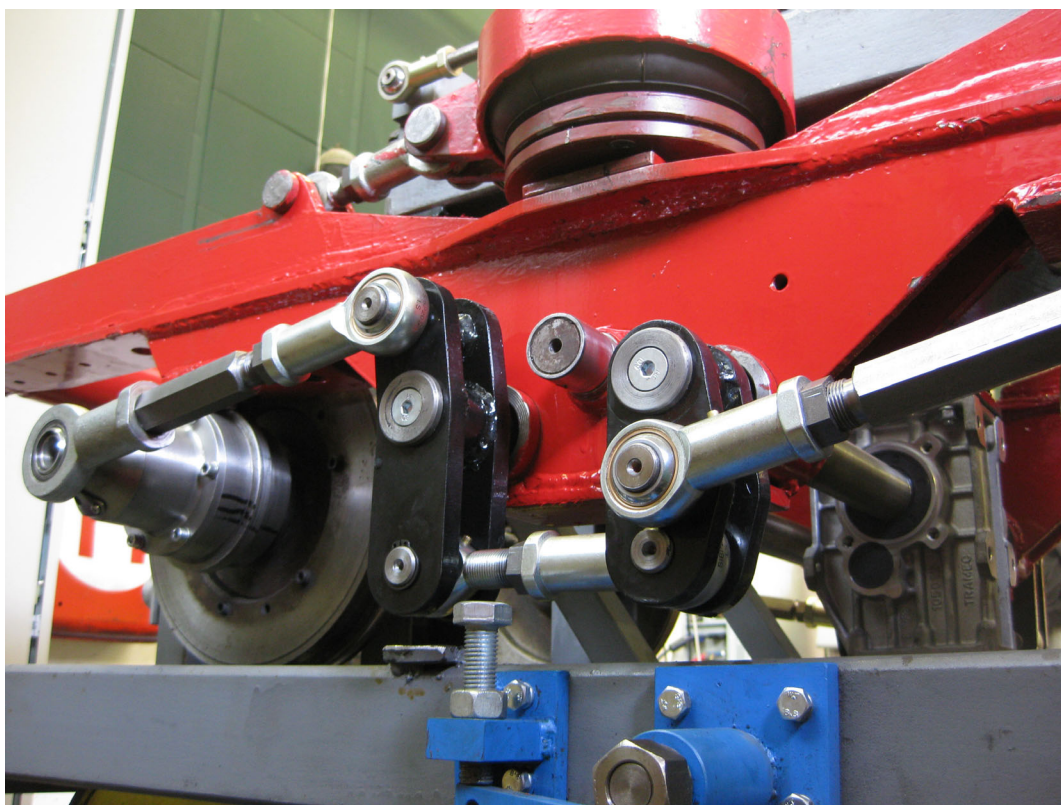
Obr. 4 Princip aktivního řízení podvozku na kladkovém stendu

Dále byl stend vybaven mechanismem radiálního stavění dvojkolí. Akčním členem je servomotor, který přes kuželovou převodovku mechanismus radiálního stavění dvojkolí ovládá. Mechanismus je navržen tak aby bylo možné použít jeden akční člen na podvozek, případně řídit obě dvojkolí nezávisle pomocí dvou akčních členů - Obr. 5,6. Žádaná hodnota kroutícího momentu servomotoru je přiváděna z výstupu měřicí karty do analogového vstupu měniče.



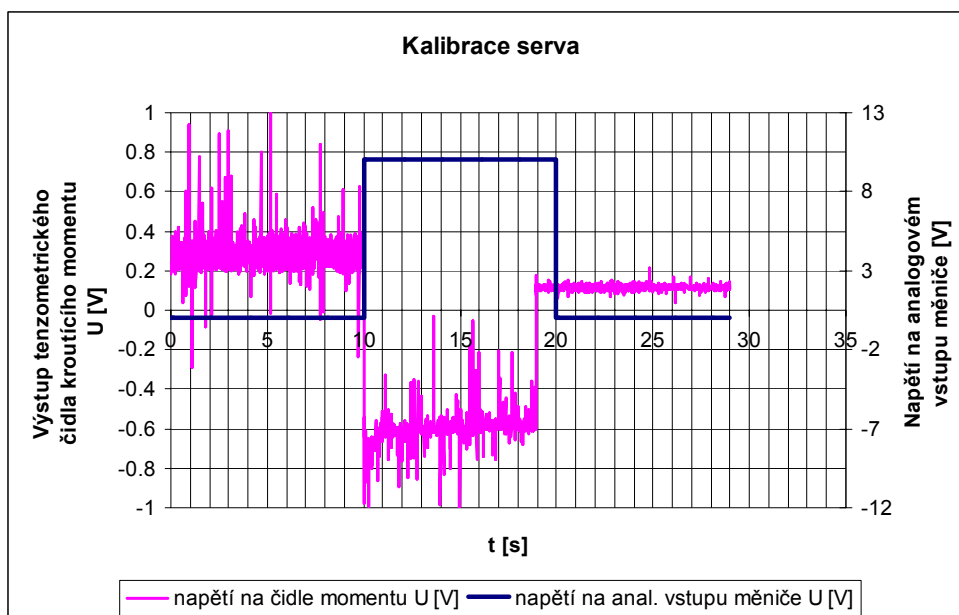
Obr. 5 CAD model 2n podvozku s aktivně řízeným natáčením dvojkolí

Stend je vybaven třemi indukčními čidly posunutí, které sledují výchylky obou dvojkolí podvozku vůči ose koleje a polohu mechanismu radiálního stavění dvojkolí. Výstupy z těchto čidel a jejich derivace jsou vstupními hodnotami řídicího obvodu.



Obr. 6 Realizace aktivně řízeného natáčení dvojkolí na kladkovém stendu

Zařízení je nyní kompletně připraveno pro plánované experimenty a ověření matematických simulací. Posledním krokem nezbytným pro úspěšnou realizaci experimentu je odstranění či minimalizace vlivu modulační frekvence frekvenčních měničů na měřící řetězec. Frekvenční měniče jsou na zařízení použity pro napájení asynchronních motorů pohonů kladek a servomotoru jako akčního členu. Obrázek 7. znázorňuje průběh napětí na čidle krouťícího momentu změřený při kalibraci akčního členu a zároveň demonstruje podstatu problému.



Obr. 7 Napětí na čidle kroutícího momentu

Na první pohled je zřejmé značné zarušení měřeného signálu. V čase cca 19s došlo k výpadku měniče vlivem proudového přetížení. Jakmile měnič není v chodu je rušení signálu řádově menší. Obdobným způsobem reagují i další čidla měřícího řetězce a to jak na měniče pohonů kladek, tak na měnič akčního členu. Dominantní frekvence rušení odpovídá modulační frekvenci měničů. Vzhledem k tomu, že tato frekvence řádově převyšuje vzorkovací frekvenci měřícího řetězce není možné rušení odstranit pomocí digitální filtrace měřeného signálu. Byla provedena řada experimentů s cílem minimalizovat ovlivnění měření měniči. Výsledkem je návrh vlastních zesilovačů signálů čidel, které se v současné době testují. Realizace těchto úprav měřícího řetězce a ověření výsledků matematických simulací se předpokládá v průběhu listopadu 2009.

6 ZÁVĚR

Elektronika a aktivně řízené prvky stále více ovlivňují konstrukci dopravních prostředků. Ačkoli u aktuálně provozovaných kolejových vozidel se s výjimkou naklápěcích skříní setkáváme s elektronickými prvky pouze u podpůrných subsystémů, lze předpokládat že regulace a aktivní řízení budou nacházet stále širší uplatnění i u kolejových vozidel. Výsledky simulací ukazují značné možnosti ovlivnění chování vozidla pomocí aktivních prvků. Od matematických simulací a experimentů na zkušebních zařízeních vede k realizaci na běžně provozovaném vozidle ještě dlouhá cesta. Kromě funkčního řešení je také třeba věnovat velkou pozornost otázkám bezpečnosti a provozní spolehlivosti. Nicméně značný potenciál aktivních prvků ve vedení dvojkolí je nepřehlédnutelný a jejich praktického využití na běžně provozovaných kolejových vozidlech se téměř jistě v budoucnosti dočkáme.

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

Literatura

- [1] ŠÍBA J., KOLÁŘ J., *Stend pro modelové zkoušky jízdních vlastností kolejových vozidel*, Současné problémy v kolejových vozidlech, (1997), UP Pardubice, sborník přednášek s. 225 -234, ISBN 80-7194-105-0.

- [2] BAUER P., KOLÁŘ J. WŮDY T., *Experimentální ověřování jízdních vlastností kolejových vozidel*, Současné problémy v kolejových vozidlech, XVII. Mezinárodní konference, Česká Třebová 2005
- [3] KALIVODA J., *Vliv dvojkolí s volnými koly na chování dvounápravových podvozků kolejových vozidel v přímé trati*, Disertační práce, ČVUT v Praze, Fakulta strojní, 2006
- [4] KALIVODA J., *Simulace aktivně řízených železničních dvojkolí s využitím propojení softwaru Simpack a Matlab-Simulink*; sborník Mezinárodní konference Technical Computing Prague 2008; ISBN 978-80-7080-692-0
- [5] MEI T.X., GODALL R. M., *Wheelset control strategies for two axle railway vehicle*, Vehicle System Dynamics, vol. 33 (supplement), str. 653-664, 1999
- [6] BRUNI S., GODALL R. M., MEI T.X., TSUNASHIMA H., *Control and monitoring for railway vehicle dynamics*, Vehicle System Dynamics, vol. 45 issue 7-8, str. 743-779, 2007
- [7] MODRLÁK O., *Základy analýzy a syntézy ve stavovém prostoru*, Skriptum TU Liberec, 2004