

OPTIMALIZACE DYNAMICKÉHO CHOVÁNÍ TRAMVAJE

OPTIMIZATION OF DYNAMIC BEHAVIOUR OF TRAM

Václav KRAUS¹, Jakub SEIDL²

Abstrakt

Ve firmě ŠKODA TRANSPORTATION se při projektování a vývoji nových tramvají věnuje značná pozornost optimalizaci jejich dynamického chování. V první fázi návrhu nových tramvají se optimalizace provádí pomocí numerických simulací na MBS modelech v softwaru Adams VI-Rail, které jsou schopny s velkou přesností predikovat dynamické chování tramvají. Podle výsledků provedených výpočtů se optimalizují jednotlivé konstrukční uzly tramvají tak, aby bylo dosaženo co nejlepšího dynamického chování tramvají. Ve druhé fázi se na reálné tramvaji provádí měření a zkoušky, které zpřesňují výsledky výpočtů provedených na MBS modelech a slouží k jejich zpětné validaci. Tento přístup umožňuje s minimálními náklady predikovat a optimalizovat dynamické chování tramvají a případně provést konstrukční změny ve fázi jejich návrhu.

Tento příspěvek pojednává o vlivu konstrukce horního mezičlánekového spojení na dynamické chování tramvaje při jízdě ve směrovém oblouku a optimalizaci uvedeného konstrukčního uzlu.

Klíčová slova

tramvaj, dynamické chování, směrový oblouk, mezičlánekové spojení

Abstract

At ŠKODA TRANSPORTATION there is paid a considerable attention to optimizing dynamic behaviour of new trams during their designing and developing. The first phase of designing new trams is performed using numerical simulations on MBS models in the Adams VI-Rail software, which are able to predict the dynamic behaviour of trams with high accuracy. individual structural nodes of trams are optimized according to the results of performed calculations in order to achieve the best dynamic behaviour of trams. In the second phase, measurements and tests are performed on a real tram, which refine results of calculations performed on MBS models and also serve for MBS model validation. This approach makes it possible to predict and optimize the dynamic behaviour of trams with minimal costs and, if necessary, to make design changes in the designing phase.

This paper deals with an influence of upper intersection connection on the dynamic behaviour of tram when passing in curve and the optimization of the intersection connection.

Keywords

tram, dynamic behaviour, curve, intersection connection

¹ Ing. Václav Kraus, Ph.D., ŠKODA TRANSPORTATION a.s. Oborový výzkum, Emila Škody 2922/1, 301 00 Plzeň. Tel.: +420 737 224 995, email: vaclav.kraus@skoda.cz

² Ing. Jakub Seidl, ŠKODA TRANSPORTATION a.s. Oborový výzkum, Emila Škody 2922/1, 301 00 Plzeň. Tel.: +420 728 874 324, email: jakub.seidl@skoda.cz

1 ÚVOD

Ve firmě ŠKODA TRANSPORTATION se věnuje značná pozornost optimalizaci dynamického chování nově konstruovaných tramvají. Tento příspěvek se zabývá popisem vyšetření vlivu místa upevnění horního mezičlánekového spojení typu příčná tyč k hrubé stavbě článku na průběh náklonu článků a na velikost momentu M_x , působícího v místě upevnění kolébky podvozku k hrubé stavbě článku při průjezdu směrovými oblouky o minimálním poloměru.

Náklon článků při průjezdu směrovými oblouky se při vývoji nových tramvají sleduje z důvodu plnění průjezdného obrysu tramvají, aby při jízdě nedošlo k vybočení tramvaje mimo stanovený obrys, což by s sebou přineslo riziko kontaktu s protijedoucí tramvají nebo ke ztrátě kontaktu lišty sběrače s napájecí trolejí.

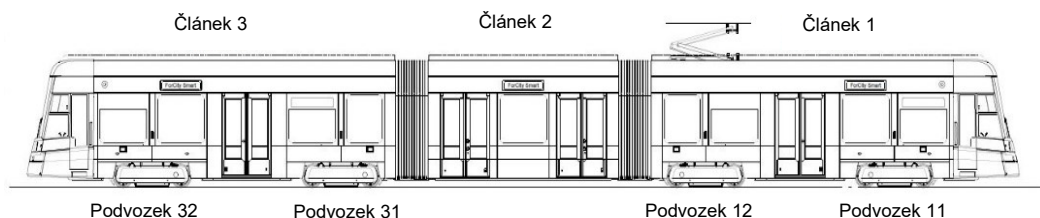
Otočné podvozky jsou u tramvají ŠKODA připojeny k článkům pomocí tzv. otočového ložiska, které umožňuje pouze rotaci podvozků vůči článkům kolem svislé osy. Síly mezi podvozkem a článkem jsou tak přenášeny pouze na malé ploše, což klade vysoké požadavky na pevnost konstrukce nadpodvozkových hnízd. Z pevnostních výpočtů předchozích tramvají vyplynulo, že pro pevnostní návrh nadpodvozkových hnízd je nejkritičtější moment kolem podélné osy M_x .

2 POPIS TRAMVAJE

Optimalizace dynamického chování byla provedena na nízkopodlažní tříčlánekové tramvaji se čtyřmi trakčními podvozky (viz obr. 1 a tab. 1). Krajní články tramvaje jsou neseny dvěma podvozky a prostřední článek je zavěšen na krajních člancích.

Tab. 1 Základní parametry tramvaje

Parametr	Symbol	Hodnota	Jednotka
hmotnost prázdné tramvaje	m	47,0	t
délka tramvaje	l	30,6	m
rozvor podvozků	a	1,8	m
počet pevných sedadel	p_{sed}	60	-
plocha pro stojící	$S_{\text{stojící}}$	30,2	m^2

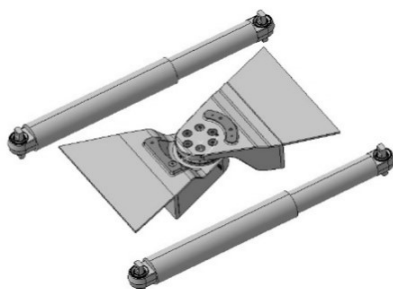


Obr. 1 Schéma tramvaje

2.1 Popis mezičlánekových spojení

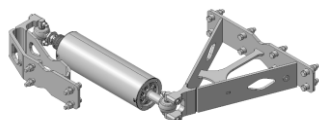
Dva sousední články tramvaje jsou mezi sebou propojeny pomocí spodního a horního mezičlánekového spojení. Mezičlánekové spojení zajišťují přenos sil z jednoho článku tramvaje na druhý a jejich konstrukce definuje povolené pohyby článků tramvaje vůči sobě.

Spodní mezičlánekové spojení je nejčastěji realizováno pomocí tzv. sférického ložiska (viz obr. 2), které svojí konstrukcí umožňuje rotaci spojených článků kolem os X (podélné), Y (příčné) a Z (svislé). Spodní spojení může být doplněno o dva podélné tlumiče, které tlumí rotační pohyby článků vůči sobě kolem svislé osy Z.

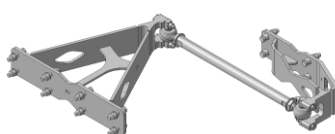


Obr. 2 Sférické ložisko doplněné o dva podélné tlumiče

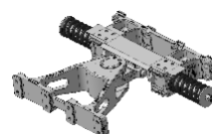
Horní mezičlánek spojení lze rozdělit do tří skupin podle pohybů, které umožňují svojí konstrukcí propojeným článkům. První skupina umožňuje rotaci propojených článků kolem všech tří os. Do této skupiny patří například spojení typu rozvolněná příčná tyč (viz obr. 3). Druhá skupina umožňuje rotaci propojených článků kolem os Y a Z. Do této skupiny patří například spojení typu pevná příčná tyč (viz obr. 4). Třetí skupina umožňuje rotaci propojených článků kolem os X a Z. Do této skupiny patří například výkyvné spojení (viz obr. 5). Horní spojení může být doplněno o podélný nebo šikmý tlumič, které tlumí rotační pohyby článků kolem příčné osy Y a šikmý i kolem podélné osy X.



Obr. 3 Spojení typu rozvolněná příčná tyč



Obr. 4 Spojení typu pevná příčná tyč



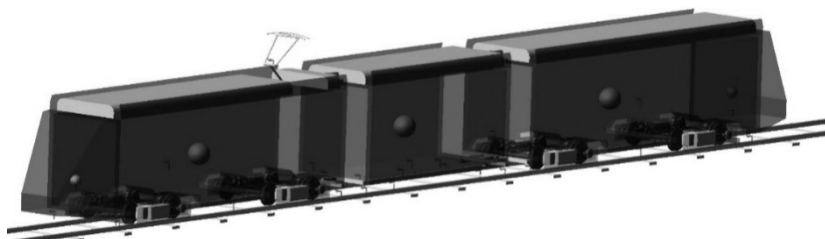
Obr. 5 Výkyvné spojení

U posuzované tříčlánekové tramvaje je mezi články 1 a 2 použito horní spojení typu rozvolněná příčná tyč (viz obr. 3) a mezi články 2 a 3 horní spojení typu pevná příčná tyč (viz obr. 4).

3 SIMULAČNÍ MODEL TRAMVAJE

Simulační model tramvaje MBS model tramvaje (obr. 6) je vytvořen v prostředí softwaru ADAMS VI-Rail 19, který ŠKODA TRANSPORTATION preferuje pro výpočet dynamického chování kolejových vozidel.

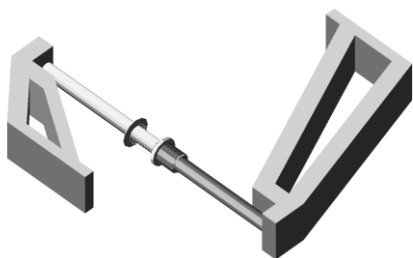
MBS model tramvaje je vytvořen tak, aby co nejvěrněji reprezentoval reálnou tramvaj. MBS model tramvaje je sestaven ze submodelů reprezentujících jednotlivé články, mezičláneková spojení a podvozky. Jednotlivé submodely MBS modelu jsou sestaveny z absolutně tuhých těles, která byla mezi sebou propojena vazbami reprezentujícími prvky vypružení, tlumičů, narážek, vazeb atd. Každé těleso je definováno svojí hmotností, polohou těžiště a momenty setrvačnosti k jednotlivým osám. Veškeré vazby MBS jsou uvažovány jako dokonalé, tedy bez tření.



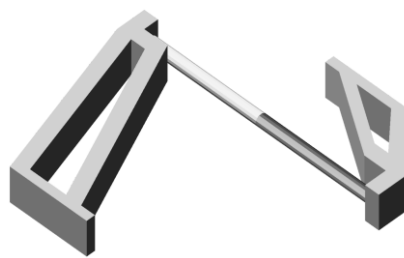
Obr. 6 MBS model tramvaje v prostředí ADAMS VI-Rail 19

3.1 Modely mezičláňkových spojení

Modely mezičláňkových spojení jsou sestaveny ze dvou konzolí. Každá konzole je uchycena k čelnicím čláňkům. Konzoly jsou navzájem spojeny příčnou tyčí, která je rozdělená na dvě poloviny. U rozvolněné příčné tyče jsou obě části příčné tyče spojeny pružinou, která dovoluje jejich roztahení nebo stlačení v ose tyče. U modelu pevné tyče byly části příčné tyče spojeny pevnou vazbou. Klouby mezi příčnou tyčí a konzolami jsou reprezentovány rotačními vazbami. MBS model mezičláňkového spojení typu rozvolněná příčná tyč je znázorněn na obr. 7, MBS model mezičláňkového spojení typu pevná příčná tyč je znázorněn na obr. 8.



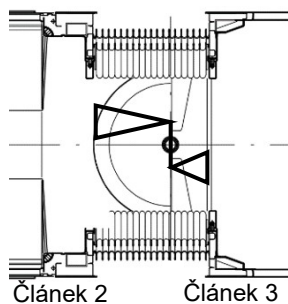
Obr. 7 MBS model rozvolněné příčné tyče



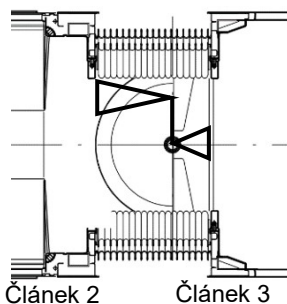
Obr. 8 MBS model pevné příčné tyče

4 VYHODNOCOVANÉ VARIANTY UPEVNĚNÍ MEZIČLÁŇKOVÉHO SPOJENÍ K HS

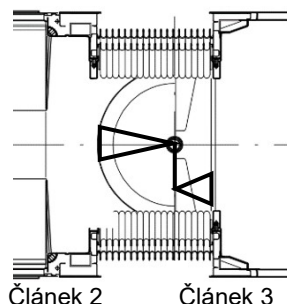
Při vyšetření bylo uvažováno s třemi různými variantami upevnění horních spojení k čelnicím čláňkům. U varianty A (viz obr. 9) je horní spojení upevněno symetricky k podélné ose vozidla, kdy střed příčné tyče byl v ose sférického ložiska. Varianta A je uvažována v prvním návrhu projektu. U varianty B (viz obr. 10) je horní spojení upevněno asymetricky k podélné ose vozidla, kdy kloub příčné tyče u krajních čláňků 1 a 3 byl v ose sférického ložiska. Horní spojení u varianty C (viz obr. 11) je upevněno obdobně jako u varianty B s tím rozdílem, že v ose sférického ložiska je kloub příčné tyče u prostředního čláňku 2.



Obr. 9 Varianta A



Obr. 10 Varianta B



Obr. 11 Varianta C

5 VÝPOČTOVÉ SCÉNÁŘE

Parametry prvního výpočtového scénáře, pro porovnání vlivu upevnění horního spojení k HS na náklon čláňků, byly stanoveny podle požadavků technických pravidel TRStrab Lichtraum [1] a TRStrab Trassierung [2] tak, aby scénář reprezentoval průjezd tramvaje směrovým obloukem o minimálním poloměru při uvažování nejhoršího stavu koleje. Zkušební trať se skládá z pravého a levého směrového oblouku o poloměru 25 m bez přechodnic proložených přímými úseky trati.

Parametry prvního výpočtového scénáře jsou uvedeny v tab. 2. Při výpočtu byl uvažován rozchod dvojkolí 1 410 mm, rozchod koleje 1 465 mm a profil kolejnice typu 60R2. Nerovnosti koleje jsou definovány podle výkonové spektrální hustoty odchylek geometrických parametrů koleje podle ERRI B176 pro horší kvalitu koleje. Rychlost tramvaje odpovídala příčnému nevyrovnanému zrychlení $0,98 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Výpočty byly provedeny pro stavy ložení tramvaje definovaného podle předpisu VDV 152 pro prázdnou tramvaj. [3]

Tab. 2 Parametry prvního výpočtového scénáře

R	$l_{\text{přímá}}$	$l_{\text{přechodnice}}$	l_{oblouk}	v
[m]	[m]	[m]	[m]	[m/s]
25	60	0.0	60	4.95

Parametry druhého výpočtového scénáře, pro porovnání vlivu upevnění horního spojení k HS na působící moment M_x v upevnění podvozku k hrubé stavbě tramvaje, byly stanoveny podle požadavků předpisu VDV 152 [3] tak, aby scénář reprezentoval průjezd tramvaje směrovým obloukem o minimálním poloměru s přechodnicí a bez převýšení. Zkušební trať se skládá z pravého a levého směrového oblouku s přechodnicemi proloženými přínými úseky trati. Při výpočtu byl uvažován rozchod dvojkolí 1 410 mm, rozchod koleje 1 465 mm a profil kolejnice typu 60R2. Trať je byla uvažována bez nerovností. Výpočty byly provedeny pro dva stavy ložení tramvaje definovaného podle předpisu VDV 152 – pro provozně obsazenou tramvaj a pro mimořádně obsazenou tramvaj. Podle požadavků předpisu VDV 152 byla pro každý stav ložení uvažována jiná rychlost jízdy tramvaje. Parametry druhého výpočtového scénáře jsou uvedeny v tab. 3.

Tab. 3 Parametry druhého výpočtového scénáře

R	$l_{\text{přímá}}$	$l_{\text{přechodnice}}$	l_{oblouk}	$V_{\text{provozní_ob.}}$	$V_{\text{mimořádné_ob.}}$
[m]	[m]	[m]	[m]	[m/s]	[m/s]
25	60	7.5	60	5.00	6.13

6 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ SIMULAČNÍCH VÝPOČTŮ

Varianta A horního spojení je při vyhodnocování výsledků uvažována jako referenční, ke které jsou porovnávány výsledky zbylých dvou variant. Z provedených simulací jsou vyhodnocovány maximální absolutní hodnoty zkoumaných veličin. Vyhodnocené veličiny u jednotlivých scénářů jsou shrnuty v tab. 4, 5 a 6. Průběhy vybraných veličin jsou zobrazeny na obr. 12 a 13.

Z porovnání výsledků jednotlivých simulací vyplývá, že pro všechny vyhodnocované parametry nejhůře vychází referenční varianta A. U varianty A dochází k většímu náklonu jednotlivých článků o 11 až 15 % (záleží na článku) a k působení většího momentu M_x o 6 až 15 % (záleží na stavu ložení a podvozku) než u variant B a C. Horší výsledky u varianty A jsou způsobeny kinematickou chybou, která je dána umístěním středu tyče do osy sférického ložiska. Ta způsobuje, že při vzájemném natáčení článků kolem osy Z dochází k parazitnímu natáčení článků kolem osy X. U varianty A také dochází, z důvodu většího náklonu článku 1, ke ztrátě kontaktu mezi lištou sběrače a elektrickou trolejí. Ke změně tohoto stavu by bylo nutné použít tužší stabilizátory kolébání na jednotlivých podvozcích, což by vedlo k větším momentům M_x působících na hrubou stavbu článků.

U variant B a C mají vyhodnocované veličiny podobné průběhy. U obou těchto variant dochází k eliminaci kinematické chyby při vzájemném natočení článků tramvaje, a proto varianty B a C vedou ke zlepšení dynamických vlastností vozidla oproti použití varianty A. Nejlepších výsledků je dosahováno u varianty B.

Tab. 4 Výsledky náklonů článku pro výpočtový scénář 1, [%]

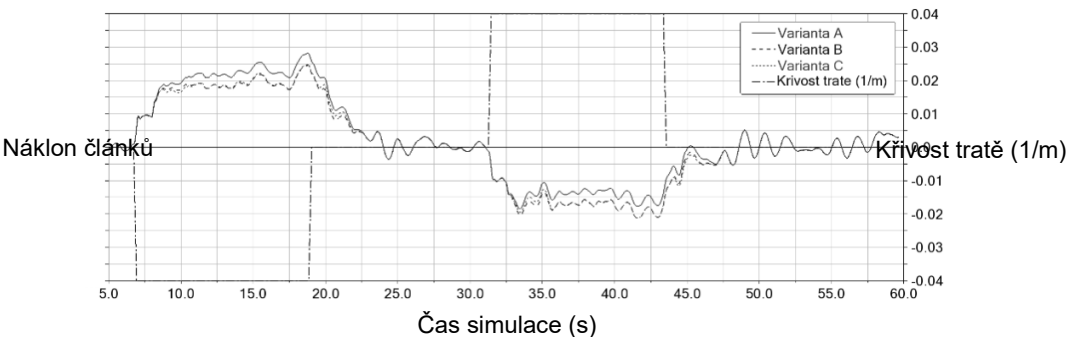
Varianta spojení	Článek 1	Článek 2	Článek 3
A	100.00	100.00	100.00
B	86.79	84.35	87.04
C	87.74	85.30	88.81

Tab. 5 Výsledky momentů Mx pro provozní obsazení tramvaje, [%]

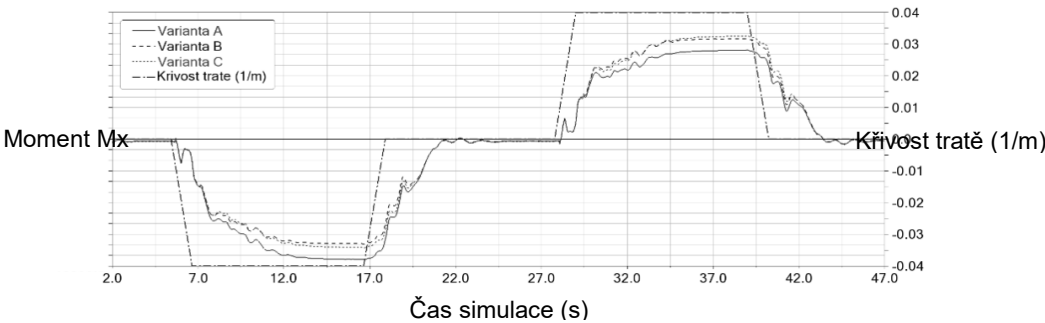
Varianta spojení	Podvozek 11	Podvozek 12	Podvozek 31	Podvozek 32
A	100.00	100.00	100.00	100.00
B	85.13	85.77	87.94	86.30
C	86.38	87.29	90.06	88.53

Tab. 6 Výsledky momentů Mx pro mimořádné obsazení tramvaje, [%]

Varianta spojení	Podvozek 11	Podvozek 12	Podvozek 31	Podvozek 32
A	100.00	100.00	100.00	100.00
B	86.89	89.03	91.14	91.79
C	90.14	92.06	93.89	93.57



Obr. 12 Průběhy náklonu článku 1 pro jednotlivé varianty mezičlánekového spojení



Obr. 13 Průběhy momentů Mx pro podvozek 11 pro jednotlivé varianty mezičlánekového spojení

7 ZÁVĚR

Tento příspěvek se zabývá vyšetřením vlivu místa upevnění horního mezičlánekového spojení typu příčná tyč k hrubé stavbě článku na dynamické chování tramvaje. Vliv byl zkoumán na průběhu náklonu jednotlivých článků tramvaje a působících momentů M_x v místech upevnění podvozku k hrubé stavbě článku.

Z provedených výpočtů vyšla nejhůře varianta A, kdy byla příčná tyč uložena symetricky vůči podélné ose vozidla. Varianta spojení A byla uvažována v prvním návrhu projektu. Výsledky vyhodnocovaných parametrů byly u varianty A o 6 až 15 % horší než u variant B a C. Proto se varianta A neuvažovala v dalších fázích návrhu tramvaje.

Varianty B a C byly dále podrobeny detailnějšímu zkoumání projektanty mezičlánekových spojení tramvaje. Při kontrole pohybů mezičlánekových spojení docházelo u varianty B ke kolizím konzole mezičlánekového spojení s čelnicí krajních článků při jízdě ve směrovém oblouku. Tento stav je z pohledu bezpečnosti provozu nepřijatelný, a proto se varianta B neuvažovala v dalších fázích návrhu tramvaje. Pro finální návrh tramvaje byla zvolena varianta C.

Úprava konstrukce mezičlánekového spojení vedla ke zmenšení náklonů článků vozidla při průjezdu směrovými oblouky a snížení momentu M_x , působícího v místě upevnění kolébky podvozku k hrubé stavbě článku. Snížení zatížení umožnilo odebrat materiál z konstrukce všech nadpodvozkových hnízd, čímž došlo ke snížení hmotnosti optimalizované tramvaje.



Literatura

- [1] *Technická pravidla pro pouliční dráhy – Dimenzace průjezdného průjezdného průřezu drah (TRStrab Lichtraum)*. 1996, ve znění ze dne 25. března 2015.
- [2] *Technická pravidla pro pouliční dráhy – Trasování drah (TRStrab Trassierung)*. 1993, ve znění ze dne 20. srpna 2014.
- [3] VDV 152. *Doporučení pro dimenzování odolnosti osobních vozidel podle BOStrab*. VDV, říjen 2016.