

Experimentální Analýza Napětí 2004

EXPERIMENTALLY SIMULATION APPROACH TO THE DRIVING STABILITY IMPROVEMENT OF THE ŠKODA 22 Tr LOW-FLOOR ARTICULATED TROLLEYBUS EXPERIMENTÁLNĚ SIMULAČNÍ PŘÍSTUP KE ZLEPŠENÍ JÍZDNÍ STABILITY NÍZKOPODLAŽNÍHO KLOUBOVÉHO TROLEJBUSU ŠKODA 22 Tr

Pavel Polach¹

During test drives with the ŠKODA 22 Tr modernized low-floor articulated trolleybus focused on the vehicle driving stability considerable rolling of the rear carriage appeared during all the driving manoeuvres. Using a sway bar in the rear carriage is a suitable constructional solution. Verification of the suitability of its constructional solution from the point of view of the required effect on the driving stability was performed using the computer simulations with the trolleybus multibody models.

Keywords Trolleybus, Driving Stability, Sway Bar, Experiment, Computer Simulations.

Úvod

Při řešení konkrétních problémů technické praxe mají nezastupitelný význam experimentální měření i počítačové simulace. Počítačové simulace mají největší uplatnění ve vývojovém stádiu a v případech pokud není možné provést experimentální měření na reálném díle.

ŠKODA VÝZKUM s.r.o. dlouhodobě spolupracuje s výrobcem silničních vozidel městské hromadné dopravy společností ŠKODA OSTROV s.r.o. [1]. Nízkopodlažní kloubový trolejbus ŠKODA 22 Tr je ve ŠKODA OSTROV s.r.o. vyráběn od roku 1996. Při modernizaci trolejbusu v roce 2002 byl v jeho konstrukci mj. použit jiný typ kloubového spojení a jiný typ hnacích náprav. Při zkušebních jízdách s modernizovaným trolejbusem zaměřených na jízdní stabilitu vozidla se při všech absolvovaných jízdách manévrech projevovalo značné klopení zadního vozu. Vhodným konstrukčním řešením je použití stabilizátoru na zadním vozu. Ověření jeho konstrukčního řešení z hlediska požadovaného účinku na jízdní stabilitu bylo provedeno s využitím počítačových simulací.

Zkušební jízdy s reálným trolejbusem

Zkušební jízdy zaměřené na hodnocení jízdní stability kloubového trolejbusu ŠKODA 22 Tr s kloubem HÜBNER a hnacími nápravami RÁBA byly realizovány pracovníky ÚVMV Praha v březnu roku 2002 [2]. Měření se uskutečnila s prázdným i s naloženým vozidlem na vybraných úsecích trolejbusových tratí v Ústí nad Labem. Provedené zkušební jízdy měly mít pouze

¹ Dr. Ing. Pavel Polach: ŠKODA VÝZKUM s.r.o.; Tylova 57, 316 00 Plzeň, Česká republika, tel.: +420378132046, e-mail: pavel.polach@skoda.cz

ověřovací charakter, o nutnosti použití stabilizátoru a využití počítačových simulací se v této době neuvažovalo.

Jízdní manévry realizované při zkušebních jízdách byly pro vozidlo méně náročné než požaduje metodika náhlého předjížděcího manévru podle ISO 3888-1. Trolejbus je totiž vázán na trakční vedení, které limituje při jízdě dráhu vozidla i rychlost změn jízdního pruhu. Při reálném provozu může být proveden jízdní manévr, který by splňoval podmínky náhlého předjížděcího manévru podle ISO 3888-1, pouze teoreticky. Zkušební manévry spočívaly v náhlém přejetí z pravého jízdního pruhu vozovky do levého, bezprostředně následovaném stejně rychlým návratem do pravého pruhu. Počáteční rychlost zkušebních jízd byla stanovena na 30 km/h. Při jízdách s prázdným trolejbusem (zatíženým na pohotovostní hmotnost) byly zkoušky ukončeny při rychlosti 60 km/h, při jízdách s naloženým vozidlem (zatíženým na cca 91 % největší povolené hmotnosti) byly s ohledem na problematické chování vozidla zkoušky ukončeny již při rychlosti 45 km/h. S prázdným vozidlem byla navíc provedena jedna zkušební jízda, při které byla ověřována odezva vozidla na periodické buzení sinovým natáčením volantu. Celkem bylo zdokumentováno 9 zkušebních jízd [2].



Obr. 1 Nízkopodlažní kloubový trolejbus ŠKODA 22 Tr

Snímanými (a zdokumentovanými) veličinami při zkušebních jízdách byly časové průběhy úhlu natočení volantu, úhlu vzájemného natočení předního a zadního vozu trolejbusu (tzv. úhlu lomení), úhlu klopení zadního vozu a bočního zrychlení zadního vozu nad zadní nápravou.

Při všech absolvovaných jízdních manévrech dosahoval úhel klopení zadního vozu (cca 6° – 8°) zřetelně větších hodnot než úhel klopení předního vozu. Výsledky experimentálních měření jednoznačně ukazovaly na malou klopnou tuhost zadní nápravy vzhledem k rozložení hmotností v konstrukci trolejbusu (např. asymetricky uložené trakční motory a značná hmotnost střešních nástaveb). Navíc při některých zkušebních jízdách (s prázdným trolejbusem od rychlosti 45 km/h a s naloženým trolejbusem již od rychlosti 30 km/h) bylo pocíťováno dosednutí dorazu, přičemž nebylo možné jednoznačně určit, zda se jedná o doraz kloubového spojení nebo doraz zadní nápravy. Při vyšších rychlostech (u prázdného trolejbusu od rychlosti 50 km/h a u naloženého trolejbusu od rychlosti 40 km/h) se jednalo již o prudký ráz. S ohledem na provozní podmínky

nebylo možné při zkouškách zvenku pozorovat, zda nastala ztráta kontaktu kol s vozovkou. Další subjektivní stabilitní vlastnosti trolejbusu byly v pořádku (nebylo pozorováno podélné rozkmitání vozidla, při přímé jízdě nebyly nutné nadměrné nebo časté korekce směru volantem a při jízdách manévrech nebyla pozorována nadměrná přetáčivost).

Na základě výsledků zkušebních jízd bylo výrobcí doporučeno provést na vozidle konstrukční úpravy, které povedou ke zmenšení úhlu klopení zadního vozu trolejbusu [2].

Ověření konstrukčního návrhu stabilizátoru zadního vozu s využitím počítačových simulací

Jako vhodné konstrukční řešení pro zmenšení úhlu klopení zadního vozu nízkopodlažního kloubového trolejbusu ŠKODA 22 Tr s kloubem HÜBNER a hnacími nápravami RÁBA bylo zvoleno použití stabilizátoru zadního vozu. Ověření vhodnosti jeho konstrukčního řešení z hlediska požadovaného účinku na jízdni stabilitu bylo provedeno s využitím počítačových simulací s multibody modely trolejbusu. Počítačové simulace měly zároveň objasnit, zda při zdokumentovaných zkušebních jízdách s reálným trolejbusem docházelo k dosednutí dorazu kloubového spojení nebo zadní nápravy.

Stabilizátor zadního vozu trolejbusu

Konstrukční návrh uvažoval torzní příčný stabilizátor zadního vozu trolejbusu vyrobený z ocelové tyče kruhového průřezu. Vhodný průměr tyče měl být stanoven na základě výsledků počítačových simulací. Stabilizátor měl mít požadovaný účinek na zmenšení úhlu klopení zadního vozu, zároveň neměly být překročeny povolené deformace a namáhání stabilizátoru. Maximální oboustranná povolená deformace všech konstrukčních variant stabilizátoru byla 61 mm, maximální povolené síly mezi stabilizátorem a zadní nápravou a mezi stabilizátorem a podvozkem zadního vozu trolejbusu jsou závislé na průměru tyče kruhového průřezu použité pro jeho výrobu. Vybrané varianty jsou uvedeny v tabulce 1 (hodnoty byly poskytnuty společností ŠKODA OSTROV s.r.o.).

Maximální povolené namáhání stabilizátoru		
Průměr tyče	Maximální povolená síla mezi stabilizátorem	
	a zadní nápravou	a podvozkem zadního vozu
35 mm	7 000 N	4 718 N
40 mm	11 430 N	8 049 N
42 mm	13 893 N	9 784 N
44 mm	16 734 N	11 785 N
45 mm	18 308 N	12 893 N

Tab. 1 Maximální povolené namáhání stabilizátoru zadního vozu

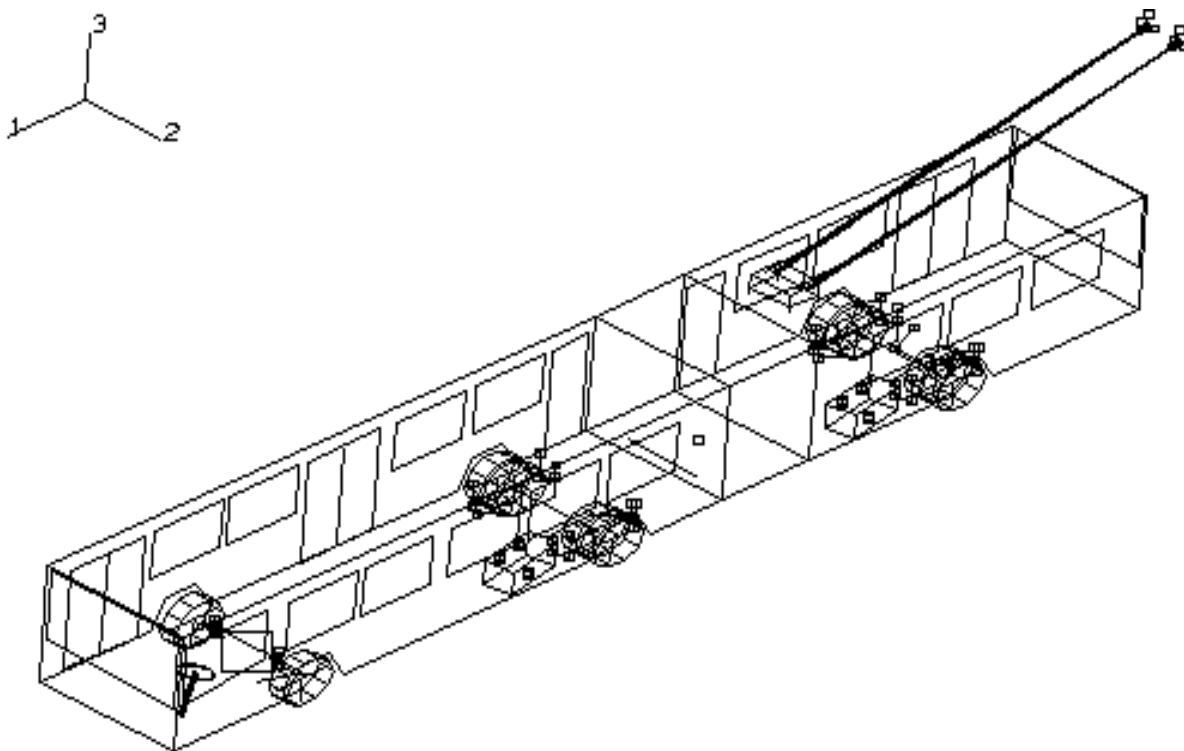
Obecně o multibody modelech

Důležitým nástrojem při vývoji a zlepšování vlastností vozidel i pro zvyšování pohodlí a pasivní bezpečnosti řidiče a cestujících [3] jsou počítačové programy určené pro kinematickou a dynamickou analýzu nelineárních prostorových vázaných mechanických systémů tvořených

soustavou těles, tzv. MBS programy. Multibody modely jsou dány konečným počtem těles navzájem spojených kinematickými vazbami a nelineárními pružně tlumícími členy. Tato tělesa se v rámci kinematických vazeb, pružně tlumících členů, způsobu připojení k základu (zemi) a dalších okrajových podmínek mohou pohybovat v prostoru. Každé těleso je definováno setrvačnými vlastnostmi (hmotností, souřadnicemi těžiště a hmotovými momenty setrvačnosti). Jednoduché těleso může být zadáno pomocí geometrického objektu (válec, koule, atd.), jeho rozměrů (např. průměr, výška, apod.) a měrnou hmotností materiálu. Setrvačností těchto jednoduchých těles se v MBS programech napočítávají automaticky. Na tělesech se zadávají body. V bodech lze tělesa spojovat kinematickými vazbami (např. volnou, sférickou, atd.) a pružně tlumícími členy, dále lze v bodech působit na tělesa nelineárními vnějšími silami a momenty. Po sestavení multibody modelu je možné simulovat jeho pohyb. Sledovanými veličinami jsou výchylky, rychlosti a zrychlení jednotlivých těles, síly a momenty působící v kinematických vazbách a v pružně tlumících členech. Výsledky lze získat ve formě číselných dat, ve formě grafů nebo znázorněním modelu (statickým nebo s animací) [4].

Multibody model trolejbusu ŠKODA 22 Tr

Multibody modely prázdného a naloženého nízkopodlažního trolejbusu ŠKODA 22 Tr s kloubem HÜBNER, hnacími nápravami RÁBA a stabilizátorem zadního vozu (obr. 2) jsou vytvořeny v mechatronickém software **alaska** (advanced lagrangian solver in kinetic analysis) [7].



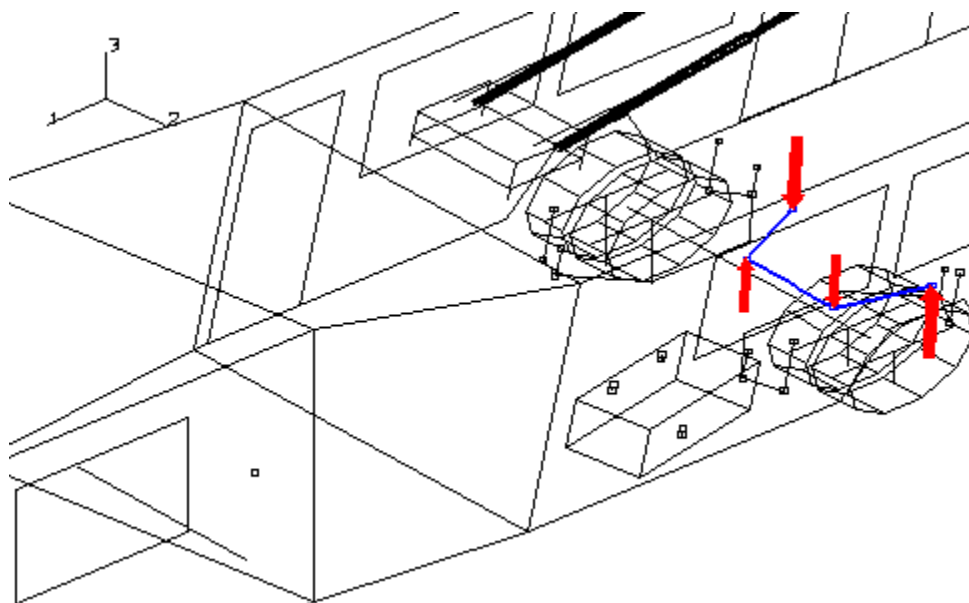
Obr. 2 Multibody model nízkopodlažního kloubového trolejbusu ŠKODA 22 Tr

Program **alaska** byl vyvinut v *Institutu für Mechatronik*, Chemnitz, SRN. Kromě tuhých těles je možné použít i speciální prvek, tzv. *superelement*, který aproximuje dynamické chování pružného nosníku. Program obsahuje moduly, které umožňují modelovat pneumatiku (*Tire Modul*) a kontakt kolo - kolejnice (*Wheel-Rail Modul*). Při simulacích pohybu s multibody

modely jsou programem **alaska** generovány Lagrangeovou metodou nelineární pohybové rovnice, které jsou řešeny přímou numerickou integrací (výsledky uvedené v tomto příspěvku byly získány při použití Champinova-Gordonova integračního algoritmu – v [7] odkaz na [8]).

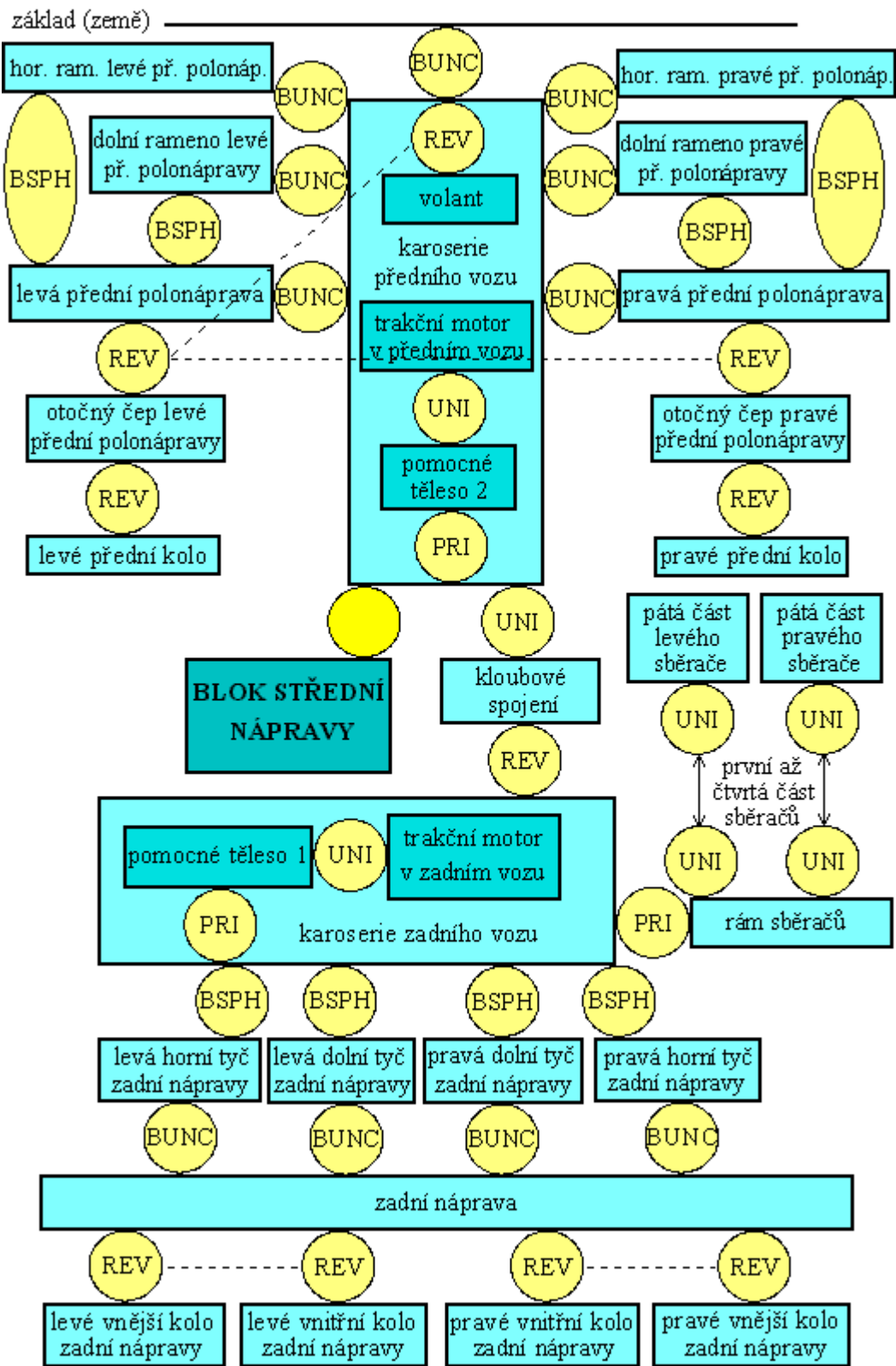
Multibody modely prázdného (hmotnost 18 556 kg) a naloženého (hmotnost 26 470 kg) nízkopodlažního kloubového trolejbusu ŠKODA 22 Tr s kloubem HÜBNER, hnacími nápravami RÁBA a stabilizátorem zadního vozu [5] byly vytvořeny na základě údajů a technické dokumentace poskytnutých výrobcem. Jsou tvořeny 47-mi tuhými tělesy, která odpovídají jednotlivým konstrukčním částím trolejbusu nebo se jedná o „pomocná“ tělesa, která jsou používána z důvodu omezené možnosti volby typů kinematických vazeb v programu **alaska** (vhodné zavedení „pomocných“ těles do multibody modelů snižuje počet řešených pohybových rovnic při simulacích provozních situací). Tělesa jsou navzájem svázána 57-mi kinematickými vazbami. Modely mají 157 stupňů volnosti. Vzduchové pružiny, tlumiče a silentbloky jsou modelovány propojením odpovídajících těles silovými pružně tlumícími prvky. K popisu směrových vlastností pneumatik je využit *Tire Modul*.

V multibody modelech kloubového trolejbusu ŠKODA 22 Tr není stabilizátor zadního vozu tvořen samostatným tuhým tělesem, jeho činnost je modelována působením vnějších sil na karoserii zadního vozu a na zadní nápravu. Síly působí proti úhlu klopení zadního vozu a jejich působiště jsou v místech montáže stabilizátoru k podvozku zadního vozu a k zadní nápravě (viz obr. 3). Mezi velikostí sil a deformacemi stabilizátoru zadního vozu je uvažována lineární závislost. Velikost těchto sil je závislá pouze na úhlu klopení zadního vozu, vertikální posuv mezi karoserií zadního vozu a zadní nápravou nemá na jejich velikost žádný vliv.

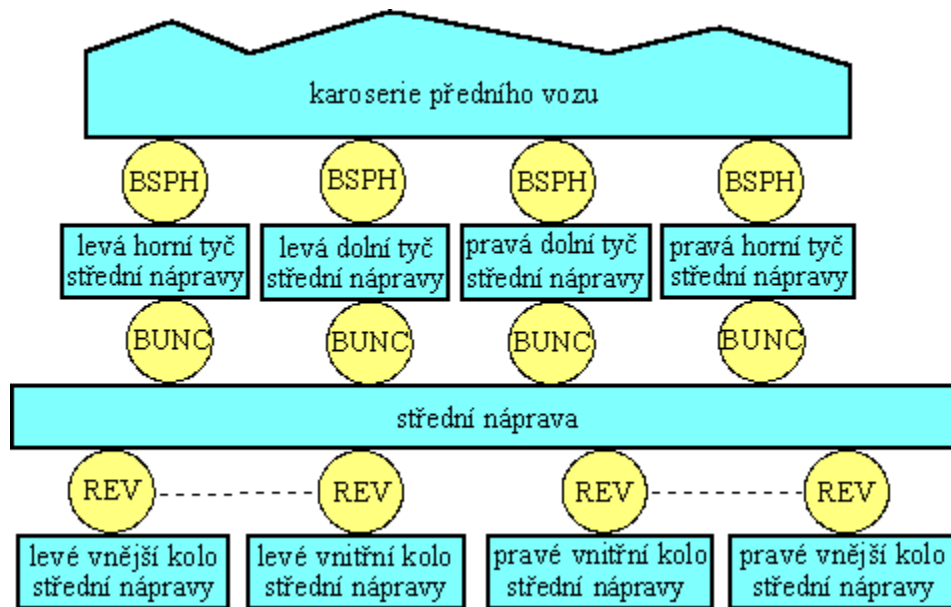


Obr. 3 Detail modelu stabilizátoru zadního vozu (působiště sil)

Kinematické schéma multibody modelu nízkopodlažního kloubového trolejbusu ŠKODA 22 Tr s kloubem HÜBNER a hnacími nápravami RÁBA je na obr. 4 (kinematické schéma střední nápravy na obr. 5). Obdélníky označují tělesa, kružnice (resp. elipsy) označují kinematické vazby (BUNC = volná, REV = rotační, PRI = posuvná, BSPH = sférická, UNI = univerzální, tj. kardanův kloub). Přerušované čáry spojují vzájemně závislé kinematické vazby.



Obr. 4 Kinematické schéma multibody modelu kloubového trolejbusu ŠKODA 22 Tr



Obr. 5 Kinematické schéma střední nápravy v multibody modelu trolejbusu ŠKODA 22 Tr

Podmínky simulací zkušebních jízd

Vstupními údaji pro simulace zkušebních jízd byly rychlosti a hmotnosti vozidla a zdokumentované časové průběhy úhlu natočení volantu [2]. Simulace byly provedeny s multibody modely trolejbusu bez stabilizátoru i s vybranými konstrukčními variantami stabilizátoru zadního vozu. Sledovanými veličinami byly, stejně jako při experimentálních měřeních, časové průběhy a extrémní hodnoty úhlu lomení, úhlu klopení zadního vozu a bočního zrychlení zadního vozu nad zadní nápravou. Při simulacích s multibody modely byly navíc sledovány extrémní hodnoty časových průběhů torzní deformace kloubového spojení a relativních výchylek vypružení zadní nápravy. Při simulacích s multibody modely trolejbusu se stabilizátorem zadního vozu byly sledovány ještě extrémní hodnoty časových průběhů vertikální deformace stabilizátoru a sil působících mezi stabilizátorem a zadní nápravou a mezi stabilizátorem a podvozkem zadního vozu [6].

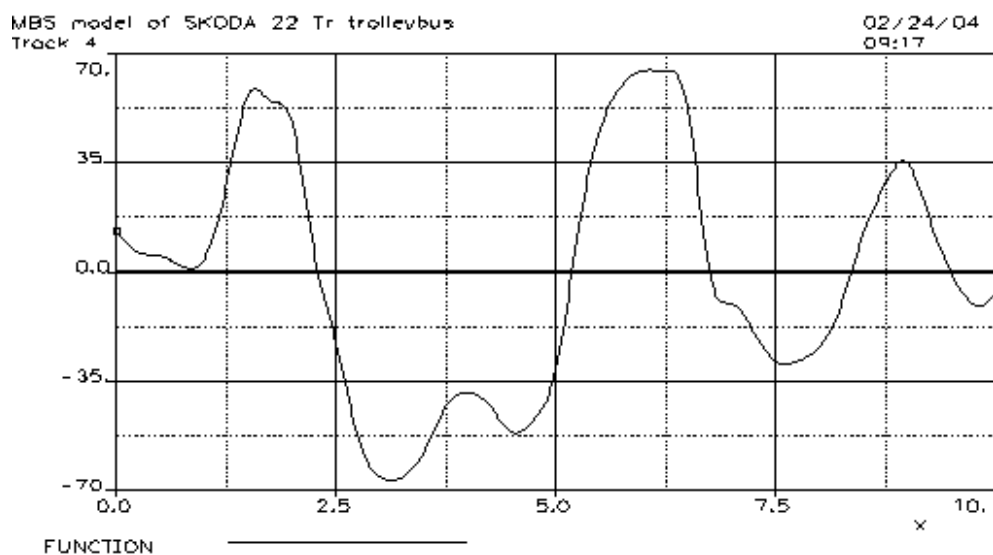
Všechny uvažované jízdni manévry začínají v čase 4 sekundy od začátku simulace jízdy multibody modelu trolejbusu. Tato doba je dostatečná pro odeznění dynamických dějů při přechodu multibody modelu z počáteční polohy (není totožná s rovnovážnou polohou, je dána počátečním nastavením kinematických vazeb v multibody modelu) do ustáleného stavu před začátkem simulace zkušební jízdy.

Přibližně konstantní rychlost multibody modelů trolejbusu je při simulacích zkušebních jízd zajištěna působením hnacího momentu na kola hnacích náprav. Při poklesu rychlosti předního vozu trolejbusu pod požadovanou hodnotu působí spojitý hnací moment ve směru jízdy, při opětovném dosažení požadované rychlosti je nulový.

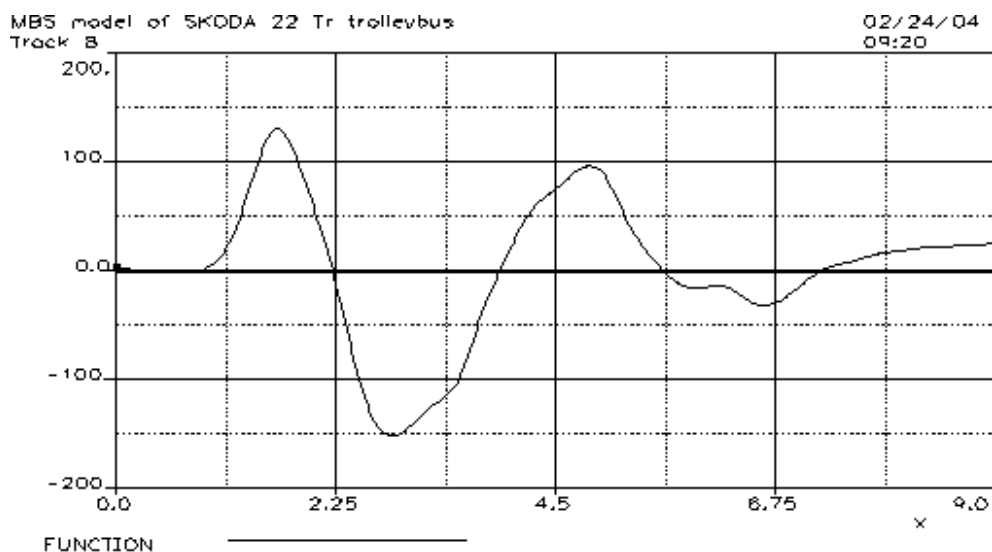
Při simulacích je uvažován suchý povrch vozovky bez vertikálních nerovností.

V tomto příspěvku jsou uvedeny výsledky simulací dvou vybraných (náročnějších) zkušebních jízd, s prázdným trolejbusem při rychlosti 55 km/h (zkušební jízda č. 4) a s naloženým při rychlosti 45 km/h (zkušební jízda č. 8). Časové průběhy úhlu natočení volantu při zkušebních

jízdách č. 4 a č. 8 (jeden ze vstupních údajů pro simulace) jsou uvedeny na obr. 6 a obr. 7. Naměřené časové průběhy úhlu klopení zadního vozu při zkušebních jízdách s reálným trolejbusem jsou převzaty ze [2] a uvedeny na obr. 8 (zkušební jízda č. 4) a na obr. 11 (zkušební jízda č. 8). Časové průběhy úhlu klopení zadního vozu stanovené při simulacích s multibody modely trolejbusu bez stabilizátoru a s některými uvažovanými konstrukčními variantami stabilizátoru zadního vozu jsou na obr. 9 a obr. 10 (zkušební jízda č. 4) a na obr. 12 a obr. 13 (zkušební jízda č. 8). Extrémní hodnoty sledovaných veličin odečtené z časových odezev jsou v tabulce 2 (zkušební jízda č. 4) a v tabulce 3 (zkušební jízda č. 8). Extrémní hodnoty časových průběhů vertikální deformace stabilizátoru a sil působících mezi stabilizátorem a zadní nápravou a mezi stabilizátorem a podvozkem zadního vozu jsou v tabulkách 2 a 3 uvedeny pouze pro pravou stranu trolejbusu. Extrémní hodnoty těchto veličin na levé straně trolejbusu mají stejné absolutní hodnoty, ale opačná znaménka. Časové průběhy sledovaných veličin mají kladné hodnoty v souladu s orientací os pravotočivé kartézské soustavy souřadnic "123" z obr. 2.



Obr. 6 Časový průběh úhlu natočení volantu při zkušební jízdě č. 4

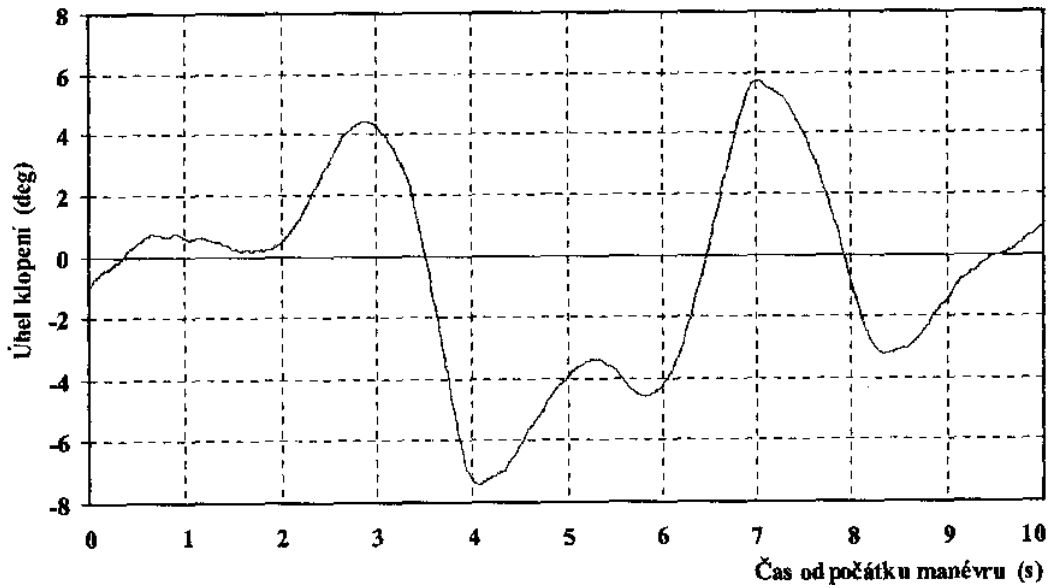


Obr. 7 Časový průběh úhlu natočení volantu při zkušební jízdě č. 8

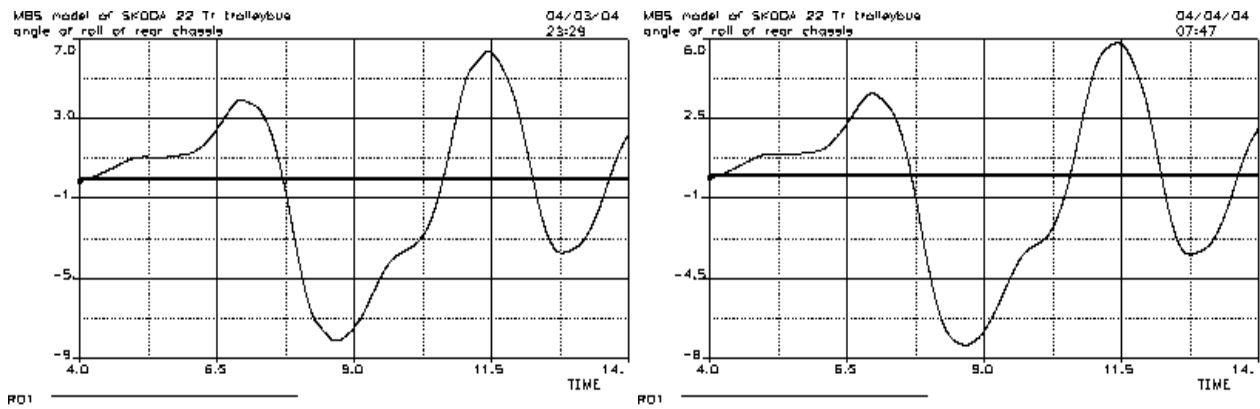
Výsledky simulací zkušební jízdy č. 4 (s prázdným trolejbusem)

Zkušební jízda č. 4								
Sledovaná veličina		Extrémy časových průběhů						
		Bez stabilizátoru		Se stabilizátorem				
		Experiment	Simulace	Ø 35 mm	Ø 40 mm	Ø 42 mm	Ø 44 mm	Ø 45 mm
Úhel lomení [deg]	min.	-12.41	-6.37	-6.44	-6.48	-6.49	-6.50	-6.50
	max.	13.08	6.63	6.76	6.82	6.84	6.87	6.88
Boční zrychlení zadního vozu [m/s ²]	min.	-3.44	-3.74	-3.73	-3.74	-3.72	-3.72	-3.71
	max.	3.05	3.45	3.44	3.43	3.44	3.46	3.47
Úhel klopení zadního vozu [deg]	min.	-7.40	-8.13	-7.43	-6.95	-6.71	-6.43	-6.27
	max.	5.72	6.36	5.82	5.50	5.32	5.11	4.99
Torzní deformace kloubového spojení [deg]	min.	neměřeno	-2.75	-2.59	-2.49	-2.39	-2.28	-2.21
	max.	neměřeno	2.92	2.79	2.70	2.68	2.66	2.65
Relativní výchylka pravých zadních pružin [m]	min.	neměřeno	-0.065	-0.061	-0.059	-0.057	-0.055	-0.054
	max.	neměřeno	0.126	0.112	0.102	0.096	0.091	0.087
Relativní výchylka levých zadních pružin [m]	min.	neměřeno	-0.065	-0.062	-0.059	-0.057	-0.055	-0.054
	max.	neměřeno	0.090	0.078	0.071	0.067	0.063	0.061
Vertikální deformace stabilizátoru (vpravo) [m]	min.	-	-	-0.050	-0.047	-0.045	-0.043	-0.042
	max.	-	-	0.063	0.058	0.056	0.054	0.052
Síla ze stabilizátoru do zadní nápravy (vpravo) [N]	min.	-	-	-5731	-8800	-10329	-11908	-12699
	max.	-	-	7206	10959	12820	14732	15674
Síla ze stabilizátoru do podvozku zadního vozu (vpravo) [N]	min.	-	-	-4857	-7717	-9028	-10375	-11038
	max.	-	-	3863	6197	7274	8386	8943

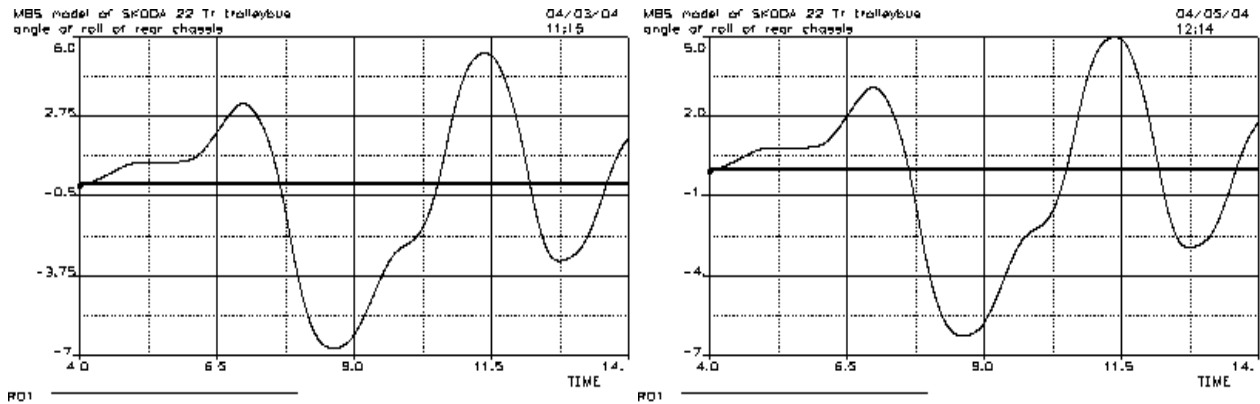
Tab. 2 Extrémní hodnoty sledovaných veličin při zkušební jízdě č. 4



Obr. 8 Časový průběh úhlu klopení zadního vozu při zkušební jízdě č. 4 (převzato ze [2])



Obr. 9 Časový průběh úhlu klopení zadního vozu při simulacích zkušební jízdy č. 4 – bez stabilizátoru a se stabilizátorem o \varnothing 35 mm

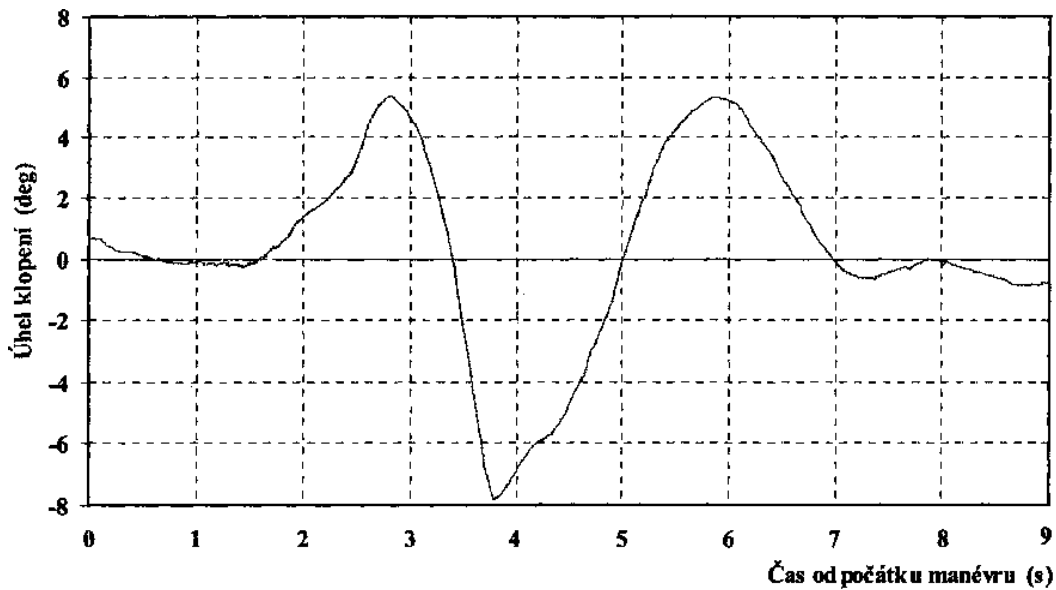


Obr. 10 Časový průběh úhlu klopení zadního vozu při simulacích zkušební jízdy č. 4 – se stabilizátorem o \varnothing 42 mm a o \varnothing 45 mm

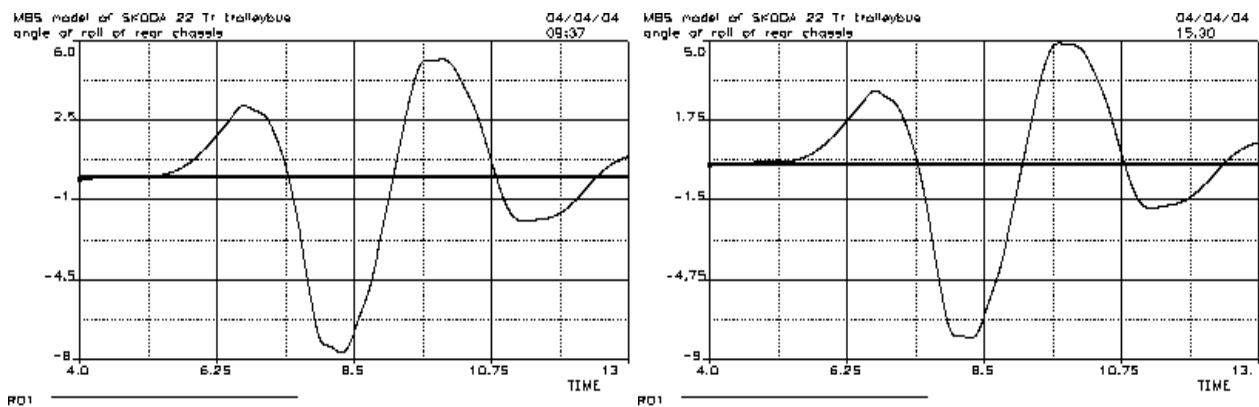
Výsledky simulací zkušební jízdy č. 8 (s naloženým trolejbusem)

Zkušební jízda č. 8								
Sledovaná veličina		Extrémy časových průběhů						
		Bez stabilizátoru		Se stabilizátorem				
		Experiment	Simulace	Ø 35 mm	Ø 40 mm	Ø 42 mm	Ø 44 mm	Ø 45 mm
Úhel lomení [deg]	min.	-6.40	-7.76	-7.98	-8.12	-8.18	-8.24	-8.28
	max.	4.45	12.29	12.36	12.40	12.42	12.45	12.46
Boční zrychlení zadního vozu [m/s ²]	min.	-3.43	-4.82	-4.84	-4.88	-4.91	-4.95	-4.97
	max.	5.70	3.24	3.28	3.29	3.29	3.30	3.31
Úhel klopení zadního vozu [deg]	min.	-7.86	-7.71	-7.14	-6.82	-6.70	-6.56	-6.49
	max.	5.36	5.18	4.89	4.70	4.58	4.41	4.32
Torzní deformace kloubového spojení [deg]	min.	neměřeno	-3.47	-3.34	-3.24	-3.20	-3.14	-3.11
	max.	neměřeno	2.90	2.86	2.84	2.82	2.81	2.80
Relativní výchylka pravých zadních pružin [m]	min.	neměřeno	-0.062	-0.058	-0.055	-0.053	-0.052	-0.051
	max.	neměřeno	0.121	0.108	0.100	0.097	0.093	0.091
Relativní výchylka levých zadních pružin [m]	min.	neměřeno	-0.064	-0.062	-0.060	-0.059	-0.058	-0.057
	max.	neměřeno	0.068	0.061	0.057	0.055	0.052	0.051
Vertikální deformace stabilizátoru (vpravo) [m]	min.	-	-	-0.042	-0.040	-0.039	-0.037	-0.036
	max.	-	-	0.060	0.056	0.055	0.054	0.053
Síla ze stabilizátoru do zadní nápravy (vpravo) [N]	min.	-	-	-4794	-7470	-8816	-10191	-10900
	max.	-	-	6859	10569	12549	14752	15922
Síla ze stabilizátoru do podvozku zadního vozu (vpravo) [N]	min.	-	-	-4623	-7443	-8837	-10389	-11213
	max.	-	-	3231	5260	6208	7177	7676

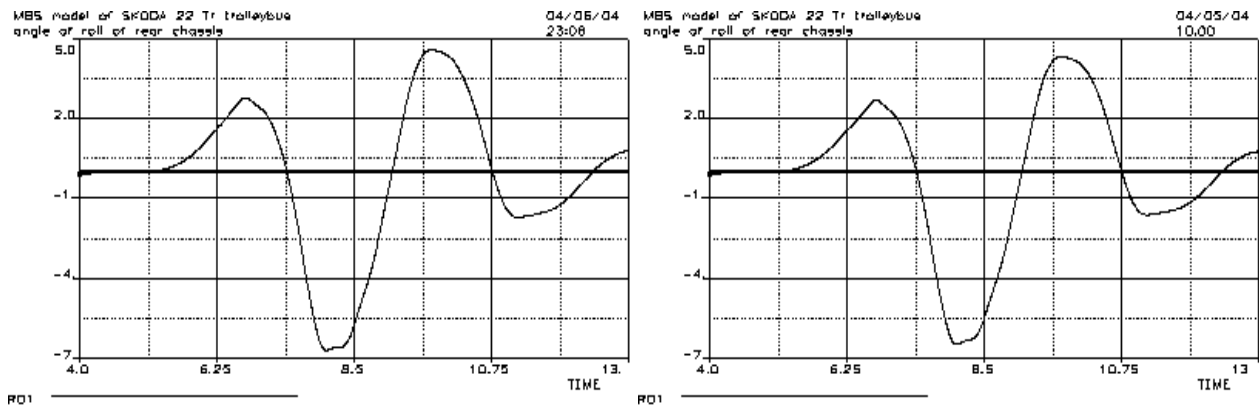
Tab. 3 Extrémní hodnoty sledovaných veličin při zkušební jízdě č. 8



Obr. 11 Časový průběh úhlu klopení zadního vozu při zkušební jízdě č. 8 (převzato ze [2])



Obr. 12 Časový průběh úhlu klopení zadního vozu při simulacích zkušební jízdy č. 8 – bez stabilizátoru a se stabilizátorem o \varnothing 35 mm



Obr. 13 Časový průběh úhlu klopení zadního vozu při simulacích zkušební jízdy č. 8 – se stabilizátorem o \varnothing 42 mm a o \varnothing 45 mm

Závěr

Časové průběhy a extrémní hodnoty sledovaných veličin zjištěné při experimentálních měřeních na reálném trolejbusu a při simulacích s multibody modely nejsou zcela shodné. Odlišnosti jsou jednak způsobeny neznalostí všech podmínek zkušebních jízd s reálným trolejbusem potřebných pro přesnější provedení simulací (nejsou zcela známy počáteční podmínky při pořizování záznamů experimentálních měření - není známa vzdálenost podvozku zadního vozu a dorazů vypružení zadní nápravy, při zde neuváděné zkušební jízdě č. 2 je počáteční úhel klopení zadního vozu 2° , apod. - a nejsou známy časové průběhy skutečné rychlosti trolejbusu - je nepravděpodobné udržení konstantní rychlosti po celou dobu trvání jízdního manévru) a jednak samotnou podstatou počítačových modelů (virtuální model je vždy zjednodušením reálné konstrukce, u modelů vozidel je obecně nejproblematictější model kontaktu pneumatiky a vozovky). Tyto skutečnosti však nenarušují vypovídací schopnost simulací, zejména posouzení vlivu stabilizátoru na snížení úhlu klopení zadního vozu trolejbusu.

Výsledky simulací ukazují, že příčina zaznamenaných nárazů při zkušebních jízdách s prázdným trolejbusem byla v dosednutí podvozku zadního vozu na dorazy vypružení zadní nápravy. Dosednutí podvozku zadního vozu na dorazy vypružení zadní nápravy (v multibody modelech je uvažována v ustáleném stavu vzdálenost podvozku zadního vozu a dorazů vypružení zadní nápravy 0.06 m) bylo zaznamenáno při simulacích stejných zkušebních jízd, při kterých byly při experimentálních měřeních zaznamenány nárazy. Maximální pružná torzní deformace kloubu HÜBNER, která je 3° , byla mírně překročena při simulaci zde neuváděné zkušební jízdy č. 5 (při rychlosti 60 km/h). Z výsledků simulací s naloženým trolejbusem vyplývá, že příčina zaznamenaných nárazů je zejména v překročení maximální pružné deformace kloubového spojení, které bylo znamenáno při dvou zkušebních jízdách, při zkušební jízdě č. 8 v kombinaci s dosednutím podvozku zadního vozu na dorazy vypružení zadní nápravy (viz tabulka 3). Důvodem relativně menších deformací vypružení zadní nápravy a větších torzních deformací kloubového spojení u naloženého trolejbusu je větší tuhost vzduchových pružin náprav naloženého vozidla.

Při simulacích zkušebních jízd s multibody modely nízkopodlažního trolejbusu ŠKODA 22 Tr s kloubem HÜBNER a hnacími nápravami RÁBA s navrženými konstrukčními variantami stabilizátoru zadního vozu se časové průběhy a extrémní hodnoty úhlu lomení a bočního zrychlení zadního vozu nad zadní nápravou liší pouze minimálně od časových průběhů a extrémních hodnot zjištěných při simulacích s multibody modely trolejbusu bez stabilizátoru. Poklesly extrémní hodnoty časových průběhů úhlu klopení zadního vozu a tím i extrémní hodnoty dalších souvisejících veličin - relativních vychylek vypružení zadní nápravy a torzní deformace kloubového spojení. Na základě simulací zdokumentovaných zkušebních jízd s multibody modely modernizovaného trolejbusu ŠKODA 22 Tr byla zvolena varianta stabilizátoru vyrobeného z tyče kruhového průřezu o průměru 42 mm. Při simulovaných jízdách se vlivem použití této varianty stabilizátoru snížily úhly klopení zadního vozu o 12 % až 23 % vzhledem k původnímu stavu (viz tabulky 2 a 3, obr. 8 až obr. 13 a [6]).

Dosednutí podvozku zadního vozu na dorazy vypružení zadní nápravy při použití stabilizátoru vyrobeného z tyče kruhového průřezu o průměru 42 mm nebylo zaznamenáno při simulaci žádné zkušební jízdy. Maximální pružná deformace kloubového spojení byla překročena pouze při zkušební jízdě č. 8 (viz tabulka 3), při které je rychlost naloženého trolejbusu již 45 km/h (i v

tomto případě došlo vlivem použití stabilizátoru zadního vozu ke zmenšení torzní deformace kloubového spojení o 11 %).

Při simulaci žádné zkušební jízdy s multibody modely se zvolenou konstrukční variantou navrženého stabilizátoru zadního vozu nebyla překročena maximální povolená deformace stabilizátoru a tím nebyly ani překročeny maximální povolené síly působící na stabilizátor.

Na základě výsledků simulací zkušebních jízd bylo možné potvrdit vhodnost navrženého konstrukčního řešení stabilizátoru zadního vozu nízkopodlažního kloubového trolejbusu ŠKODA 22 Tr s kloubem HÜBNER a hnacími nápravami RÁBA na zlepšení jeho jízdní stability.

Príspevek vznikl v rámci řešení výzkumného záměru Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy České republiky MSM4771868401 „Výzkum provozní degradace perspektivních konstrukčních materiálů“.

Literatura

- [1] Kepka, M. – Hejman, M. - Polach P. - Václavík J.: *Using the Computer Simulations at Trolleybus Development: Strength, Dynamic and Fatigue* - CD-ROM Proceedings of European Conference on Computational Mechanics '99, Munich, 1999, 14 p.
- [2] *Protokol č. 40103-02 - L16* Laboratoř ovladatelnosti a jízdního pohodlí, Ústav pro výzkum motorových vozidel, Praha, 2002, 10 str.
- [3] Polach, P.: *Multibody Simulations of a Low-Floor Trolleybus Model with a Driver and Passengers* - CD-ROM Proceedings of ECCOMAS Thematic Conference on Advances in Computational Multibody Dynamics 2003, Lisbon, 2003, 16 p.
- [4] Polach, P. - Jankovec, J. - Hejman, M.: *Možnosti zpřesňování MBS a MKP modelů silničních vozidel* - sborník Třetí vědecké konference "Nové trendy v dopravě a spojích", Díl I., str. 89-96, Pardubice, 2003
- [5] Polach, P.: *Multibody modely nízkopodlažního kloubového trolejbusu ŠKODA 22 Tr - modifikace s kloubem HÜBNER, hnacími nápravami RÁBA a stabilizátorem zadního vozu* - výzkumná zpráva ŠKODA VÝZKUM s.r.o. VYZ 0569/2002, Plzeň, 2002, 36 str.
- [6] Polach, P.: *Vyšetřování vlivu stabilizátoru zadního vozu na jízdní stabilitu kloubového trolejbusu ŠKODA 22 Tr s kloubem HÜBNER a hnacími nápravami RÁBA* - výzkumná zpráva ŠKODA VÝZKUM s.r.o. VYZ 0568/2002, Plzeň, 2002, 60 str.
- [7] *alaska, User Manual, Version 2.3* - Institute of Mechatronics Chemnitz, 1998
- [8] Shampine, L. F. – Gordon, M. K.: *Computer-Lösung gewöhnlicher Differentialgleichungen* - Friedrich Vieweg & Sohn Braunschweig/Wiesbaden, 1984