

Experimentální **A**nalýza **N**apětí **2005**

VERIFICATION OF THE APPROACH TO THE CONSTRUCTIONAL DESIGN OF THE SWAY BAR IN THE REAR CARRIAGE OF THE ŠKODA 22 LOW-FLOOR ARTICULATED TROLLEYBUS

OVĚŘENÍ PŘÍSTUPU K NÁVRHU STABILIZÁTORU ZADNÍHO VOZU NÍZKOPODLAŽNÍHO KLOUBOVÉHO TROLEJBUSU ŠKODA 22 Tr

Pavel Polach¹

The ŠKODA 22 Tr low-floor articulated trolleybus has been produced in ŠKODA OSTROV s.r.o. since 1996. During its modernization in 2002 other type of articulated joint and other type of driving axles was used in its construction among others. In the course of testing drives with the modernized trolleybus, which were focused on a driving stability of the vehicle, large rear carriage rolling occurred during all the performed driving manoeuvres. As a suitable constructional solution for reducing the roll angle of the rear carriage of the modernized ŠKODA 22 Tr low-floor articulated trolleybus was the using of the rear carriage sway bar. The constructional design considered a torsional lateral sway bar of the rear carriage made of a steel bar of the circular cross-section. The effect of the sway bar on dynamic properties of the vehicle and a suitable bar diameter was determined on the basis of results of computer simulations with the trolleybus multibody models.

Again, testing drives focused on the driving stability of the vehicle were performed with the real trolleybus, in the structure of which the designed rear carriage sway bar was used. On the basis of computer simulations of the testing drives with the trolleybus multibody models the correctness of the experimental simulation approach used in the sway bar constructional design was verified.

Keywords

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

Klíčová slova

trolejbus, jízdní stabilita, stabilizátor, experiment, počítačové simulace

Úvod

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 jízdních manévrech projevovalo značné klopení zadního vozu. Jako vhodné konstrukční řešení pro zmenšení úhlu klopení zadního vozu modernizovaného nízkopodlažního kloubového trolejbusu ŠKODA 22 Tr bylo zvoleno použití stabilizátoru zadního vozu. Konstrukční návrh uvažoval torzní příčný stabilizátor zadního vozu trolejbusu vyrobený z ocelové tyče

¹ Dr. Ing. Pavel Polach: ŠKODA VÝZKUM s.r.o.; Tylova 57, 316 00 Plzeň, tel.: +420-378132046, e-mail: pavel.polach@skoda.cz

kruhového průřezu. Účinek stabilizátoru na dynamické vlastnosti vozidla a vhodný průměr tyče (42 mm) byly stanoveny na základě výsledků počítačových simulací s multibody modely prázdného a naloženého trolejbusu [1], [2].

S reálným trolejbusem, v jehož konstrukci byl již použit navržený stabilizátor zadního vozu, byly provedeny opět zkušební jízdy zaměřené na jízdní stabilitu vozidla [3]. Na základě počítačových simulací těchto zkušebních jízd s multibody modelem naloženého trolejbusu byla ověřena správnost experimentálně simulačního přístupu použitého pro konstrukční návrh stabilizátoru.

Zkušební jízdy s reálným trolejbusem

Zkušební jízdy zaměřené na hodnocení jízdní stability kloubového trolejbusu ŠKODA 22 Tr s kloubem HÜBNER, hnacími nápravami RÁBA a stabilizátorem zadního vozu byly realizovány pracovníky ÚVMV Praha v září roku 2002 [3]. Měření se uskutečnila pouze s naloženým vozidlem (zatíženým na cca 98 % největší povolené hmotnosti) na trolejbusové trati mezi obcemi Ostrov nad Ohří a Jáchymov. Provedené zkušební jízdy měly ověřit vliv konstrukčního řešení stabilizátoru na zmenšení úhlu klopení zadního vozu.



Obr. 1 Nízkopodlažní kloubový trolejbus ŠKODA 22 Tr

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 manévru, 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, zkoušky byly ukončeny při rychlosti 55 km/h (s ohledem na možné poškození vozidla nebo trakčního vedení při vypadnutí sběračů). Pro každou zkušební rychlost bylo provedeno několik manévru, z nichž byl vždy následně vyhodnocen a zdokumentován nejzdařilejší. V technickém protokolu [3] jsou uvedeny výsledky pěti zkušebních jízd.

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.

Hodnocení stabilitních vlastností nízkopodlažního kloubového trolejbusu ŠKODA 22 Tr bylo prováděno jednak subjektivně na základě pozorování chování vozidla a jednak za základě měření již zmíněných vybraných veličin popisujících pohyb vozidla. Z důvodu, že obdobná měření provedená na vozidle bez stabilizátoru zadního vozu [4] jednoznačně prokázala za nejkritičtější z hlediska jízdní stability chování zadního vozu trolejbusu při plném zatížení, bylo při zkušebních jízdách upuštěno od zkoušek vozidla při pohotovostní hmotnosti a od měření veličin popisujících pohyb předního vozu.

Z výsledků zkušebních jízd vyplynulo, že limitujícím faktorem pro jízdní stabilitu vozidla je, i po použití stabilizátoru zadního vozu, chování zadního vozu (zejména jeho klopení a vybočování ze směru). Vozidlo se chovalo neutrálně až do okamžiku, než došlo k dosednutí podvozku zadního vozu na dorazy vypružení zadní nápravy (od rychlosti cca 40 km/h). Při vyšších rychlostech vzrůstaly směrové úchylny zadní nápravy, zadní vůz vyjížděl z jízdní dráhy (tzv. přetáčivý smyk) a po návratu do přímého směru docházelo k jeho překmitávání.

Porovnání stabilitních vlastností nízkopodlažního kloubového trolejbusu ŠKODA 22 Tr bez stabilizátoru zadního vozu [4] a se stabilizátorem zadního vozu [3] na základě zdokumentovaných zkušebních jízd je možné pouze do určité míry, neboť vozidlo řídil jiný řidič na jiné zkušební dráze a prováděné jízdní manévry nemohly být z důvodu nevytyčení trati zcela totožné. Z výsledků uvedených ve [4] (resp. v [1]) a ve [3] je však zřejmé, že použitím stabilizátoru zadního vozu se jízdní stabilita trolejbusu ŠKODA 22 Tr celkově zlepšila:

1. Nenastala situace, při níž by byly identifikovány ve sledovaných veličinách nárazy způsobené překročením maximální pružné deformace kloubového spojení.
2. Poklesly extrémní hodnoty časových průběhů úhlu klopení zadního vozu a tím i extrémní hodnoty dalších souvisejících veličin - relativních výchylek vypružení zadní nápravy a torzní deformace kloubového spojení.
3. Nepříznivé stabilitní vlastnosti trolejbusu se projevovaly až při rychlostech jízdy vyšších o cca 10 km/h až 15 km/h [3].

Simulace s multibody modelem

Stabilizátor zadního vozu nízkopodlažního kloubového trolejbusu ŠKODA 22 Tr s kloubem HÜBNER a hnacími nápravami RÁBA byl navržen na základě výsledků počítačových simulací [1] zkušebních jízd zdokumentovaných ve [4]. K ověření vhodnosti experimentálně simulačního přístupu k jeho návrhu byly provedeny simulace zkušebních jízd zdokumentovaných ve [3].

Obecně o multibody modelech

Důležitým nástrojem při vývoji a zlepšování vlastností vozidel i pro zvyšování pohodlí a pasivní bezpečnosti řidiče a cestujících [5] jsou počítačové programy určené pro kinematickou a dynamickou analýzu nelineárních prostorových vázaných mechanických systémů tvořených soustavou těles, tzv. MBS programy. Přístup k řešení úloh z oblasti mechaniky s využitím výpočtových modelů založených na soustavách těles umožňuje řešení podstatně obecnějších problémů než přístup založený na metodě konečných prvků, protože není závislý na kontinuálním modelu vyšetřovaného systému. Důsledkem větší obecnosti tohoto přístupu jsou značné nároky na výpočtový čas řešení sestavené soustavy nelineárních rovnic. Při tvorbě multibody modelu je tedy nezbytné uvážlivě volit počet těles, počet kinematických vazeb a zejména celkový počet stupňů volnosti v kinematických vazbách mechanické soustavy, tzn. optimálně interpretovat fyzikální podstatu řešeného problému.

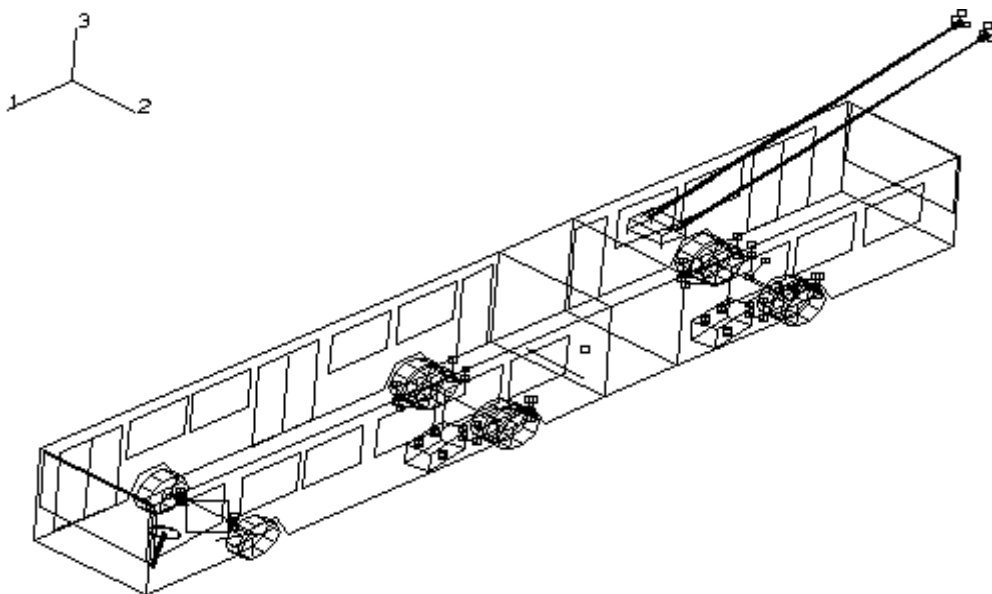
Celkový počet stupňů volnosti v kinematických vazbách totiž určuje počet sestavených nelineárních pohybových rovnic, jejichž řešení by mělo být zvládnutelné v reálném časovém intervalu.

Multibody modely jsou tvořeny konečným počtem těles navzájem spojených kinematickými vazbami a pružně tlumicími členy. Tato tělesa se v rámci kinematických vazeb, pružně tlumicích členů, způsobu připojení k rámu a dalších okrajových podmínek mohou pohybovat v prostoru. Každé těleso je definováno setrvačnostními vlastnostmi (hmotností, souřadnicemi těžiště a hmotovými momenty setrvačnosti). Na tělesech se zadávají body. V bodech lze tělesa spojovat kinematickými vazbami a pružně tlumicími členy, dále lze v bodech působit na tělesa vnějšími silami a momenty. Po sestavení MBS modelu je možné simulovat jeho pohyb. Při simulacích pohybu modelů generují MBS programy nelineární pohybové rovnice, které jsou řešeny přímou numerickou integrací. Sledovanými veličinami mohou být výchylky, rychlosti a zrychlení jednotlivých těles, síly a momenty působící v kinematických vazbách a v pružně tlumicích členech. Výsledky lze získat ve formě číselných dat, ve formě grafů nebo znázorněním modelu (statickým nebo s animací) [6].

Multibody model trolejbusu ŠKODA 22 Tr

Multibody modely 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) [9].

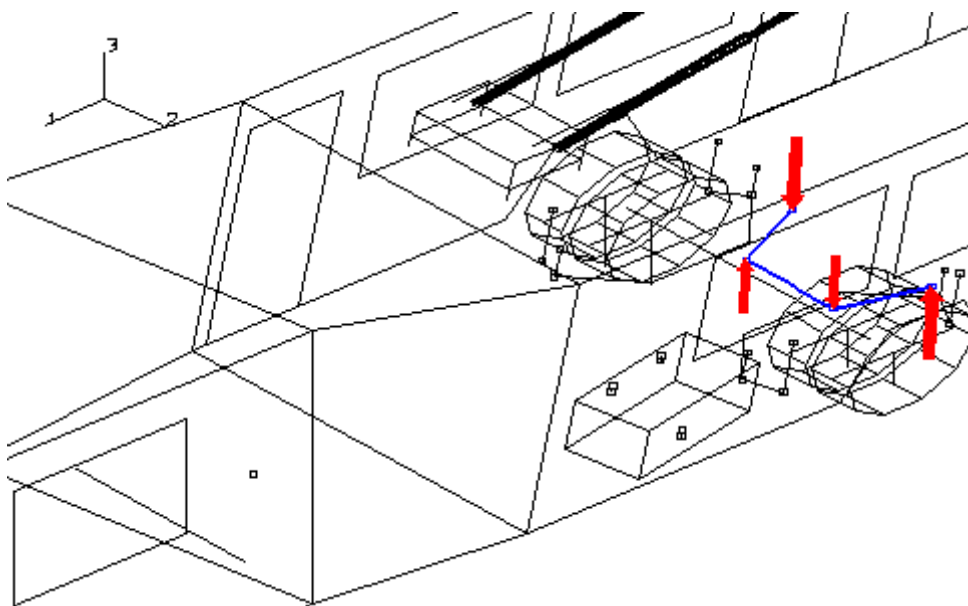
Program **alaska** byl vyvinut v *Institutu für Mechatronik*, Chemnitz, SRN. Součástí programu je mj. i modul, který umožňuje modelovat pneumatiku (*Tire Module*). Při simulacích pohybu s multibody modely jsou programem **alaska** generovány nelineární pohybové rovnice Lagrangeovou metodou (výsledky uvedené v tomto příspěvku byly získány řešením těchto rovnic Shampinovým-Gordonovým integračním algoritmem – v [9] odkaz na [10]).



Obr. 2 Multibody model nízkopodlažního kloubového trolejbusu ŠKODA 22 Tr

Multibody model naloženého nízkopodlažního kloubového trolejbusu ŠKODA 22 Tr s kloubem HÜBNER, hnacími nápravami RÁBA a stabilizátorem zadního vozu [7] byl pro účely simulací zkušebních jízd uskutečněných na trolejbusové trati mezi obcemi Ostrov nad Ohří a Jáchymov v září roku 2002 modifikován na základě celkové hmotnosti vozidla (27 860 kg) uvedené v technickém protokolu [3]. Je tvořen 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 sníží počet řešených pohybových rovnic při simulacích provozních situací). Tělesa jsou navzájem svázána 57-mi kinematickými vazbami. Model má 157 stupňů volnosti. Vzduchové pružiny a hydraulické tlumiče ve vypružení náprav a silentbloky v místech montáže některých konstrukčních částí trolejbusu jsou modelovány propojením odpovídajících těles nelineárními silovými pružně tlumicími členy. K popisu směrových vlastností pneumatik je využit *Tire Module*.



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

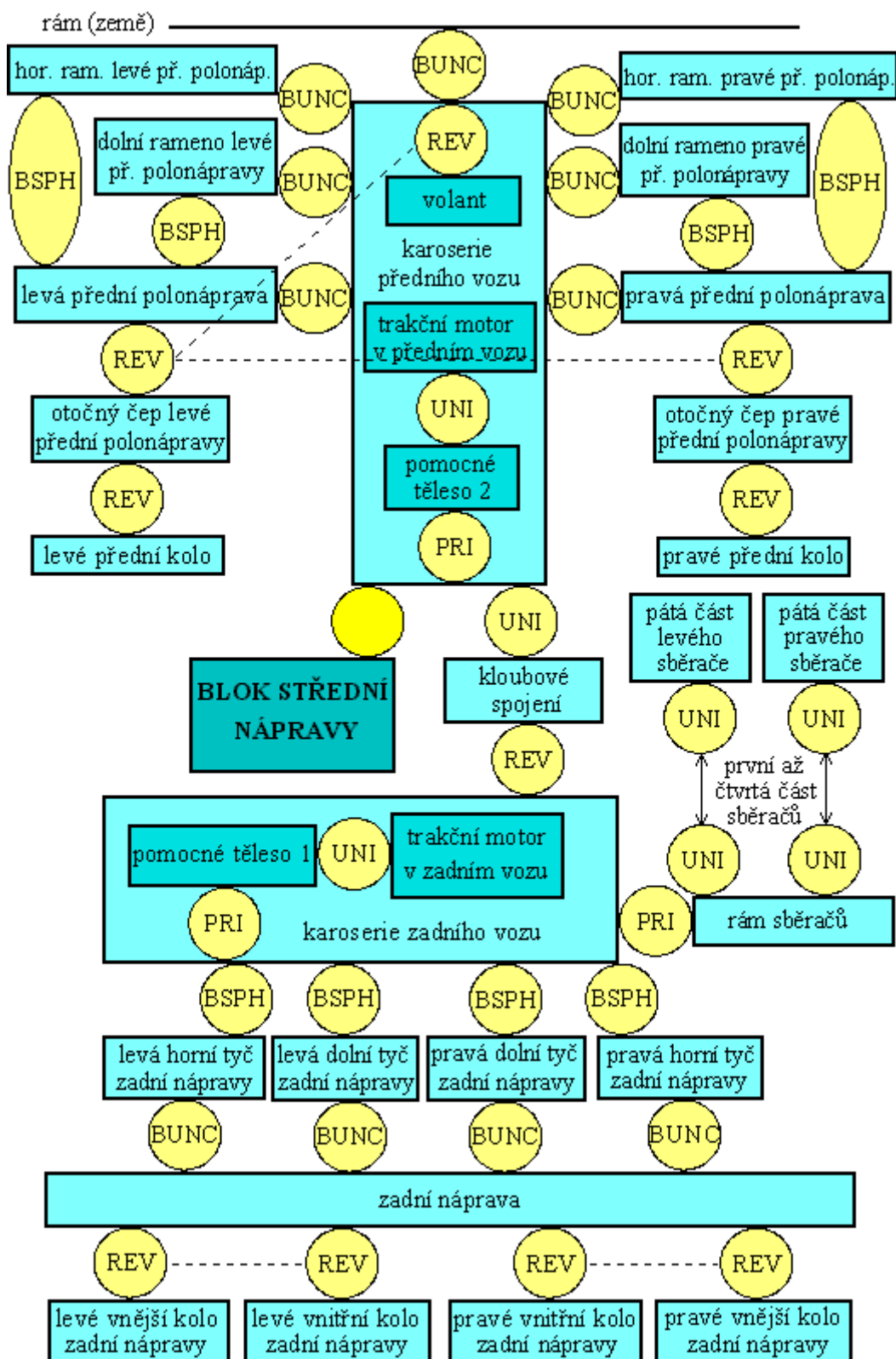
V multibody modelech kloubového trolejbusu ŠKODA 22 Tr není stabilizátor zadního vozu tvořen samostatným tuhým tělesem, jeho činnost je modelována působením vnějších sil na karoserii zadního vozu a na zadní nápravu. Síly působí proti úhlu klopení zadního vozu a jejich působíště jsou v místech montáže 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.

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, kruhy (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.

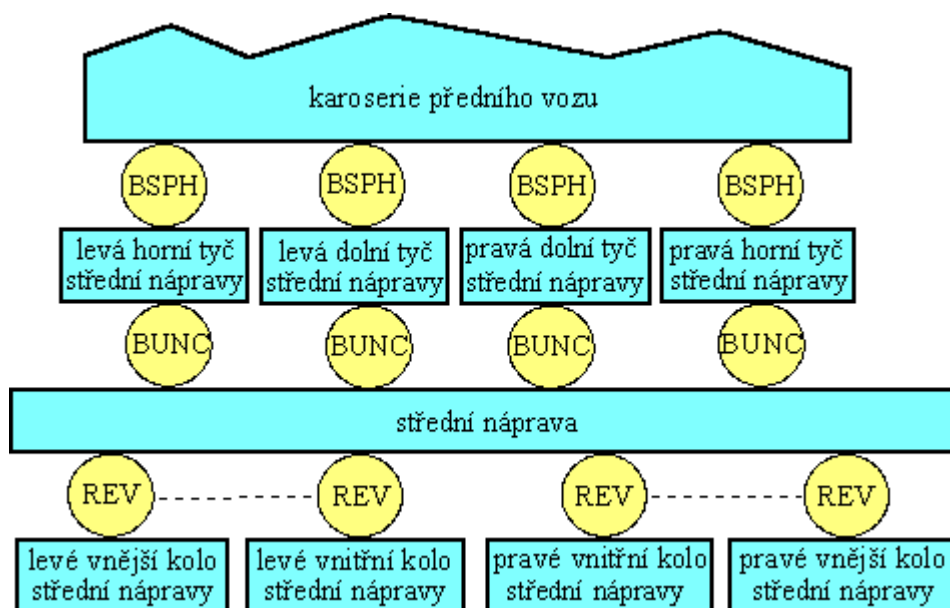
Podmínky simulací zkušebních jízd

Vstupními údaji pro simulace zkušebních jízd byly rychlosti a zdokumentované časové průběhy úhlu natočení volantu [3]. Simulace byly provedeny s multibody modely trolejbusu se stabilizátorem i bez 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 modelem trolejbusu se stabilizátorem zadního vozu byly sledovány ještě extrémní hodnoty časových průběhů vertikální deformace stabilizátoru.



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



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

Všechny uvažované jízdní 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 modelu trolejbusu je při simulacích zkušebních jízd zajištěna působením hnacího momentu na kola hnacích náprav. Při poklesu rychlosti předního vozu trolejbusu pod požadovanou hodnotu působí na kola hnacích náprav spojitý hnací moment ve směru jízdy, při opětovném dosažení požadované rychlosti je tento moment nulový.

Při simulacích je uvažován suchý povrch vozovky bez vertikálních nerovností.

V tomto příspěvku jsou uvedeny výsledky simulací všech zdokumentovaných zkušebních jízd. Časové průběhy úhlu natočení volantu (jeden ze vstupních údajů pro simulace) jsou na obr. 6, obr. 10, obr. 14, obr. 18 a obr. 22. Naměřené časové průběhy úhlu klopení zadního vozu při zkušebních jízdách s reálným trolejbusem jsou převzaty ze [3] a uvedeny na obr. 7, obr. 11, obr. 15, obr. 19 a obr. 23. Časové průběhy úhlu klopení zadního vozu stanovené při simulacích s multibody modelem trolejbusu se stabilizátorem zadního vozu jsou na obr. 8, obr. 12, obr. 16, obr. 20 a obr. 24. Časové průběhy úhlu klopení zadního vozu stanovené při simulacích s multibody modelem trolejbusu bez stabilizátoru zadního vozu jsou na obr. 9, obr. 13, obr. 17, obr. 21 a obr. 25. Hodnoty úhlů ve všech grafech jsou uváděny ve stupních.

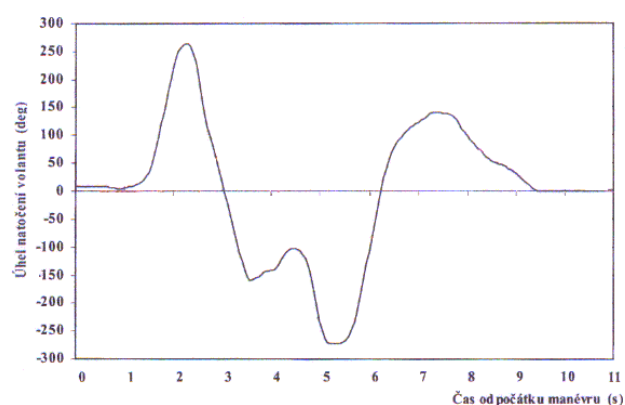
Extrémní hodnoty sledovaných veličin odečtené z časových odezev jsou v tabulkách 1 až 5. Extrémní hodnoty časových průběhů vertikální deformace stabilizátoru jsou v tabulkách 1 až 5 uvedeny pouze pro pravou stranu trolejbusu. Extrémní hodnoty těchto veličin na levé straně trolejbusu mají stejné absolutní hodnoty, ale opačná znaménka.

Časové průběhy sledovaných veličin mají kladné hodnoty v souladu s orientací os pravotočivé kartézské soustavy souřadnic "123" z obr. 2.

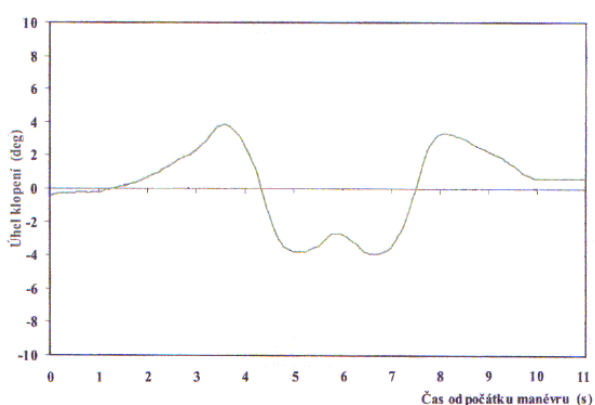
Výsledky simulací zkušební jízdy č. 1 (při rychlosti 30 km/h)

Sledovaná veličina		Extrémy časových průběhů		
		Se stabilizátorem		Bez stabilizátoru
		Experiment	Simulace	
Úhel lomení [deg]	min.	-14.72	-14.01	-14.01
	max.	16.67	16.20	16.34
Boční zrychlení zadního vozu [m/s^2]	min.	-2.56	-3.39	-3.36
	max.	2.17	2.78	2.78
Úhel klopení zadního vozu [deg]	min.	-3.90	-3.85	-4.76
	max.	3.87	3.05	3.65
Torzní deformace kloubového spojení [deg]	min.	neměřeno	-2.89	-3.02
	max.	neměřeno	2.79	2.78
Relativní výchylka pravých zadních pružin [m]	min.	neměřeno	-0.038	-0.046
	max.	neměřeno	0.047	0.062
Relativní výchylka levých zadních pružin [m]	min.	neměřeno	-0.034	-0.042
	max.	neměřeno	0.032	0.043
Vertikální deformace stabilizátoru (vpravo) [m]	min.	neměřeno	-0.026	-
	max.	neměřeno	0.031	-

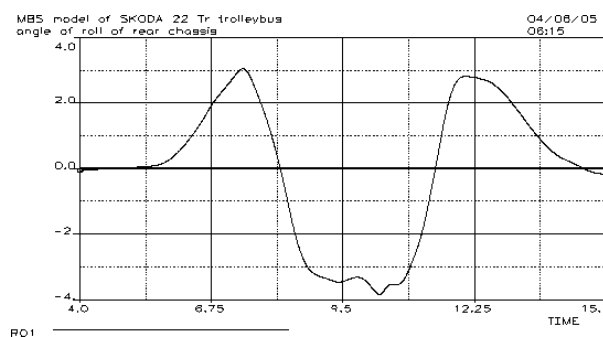
Tab. 1 Extrémní hodnoty sledovaných veličin při zkušební jízdě č. 1



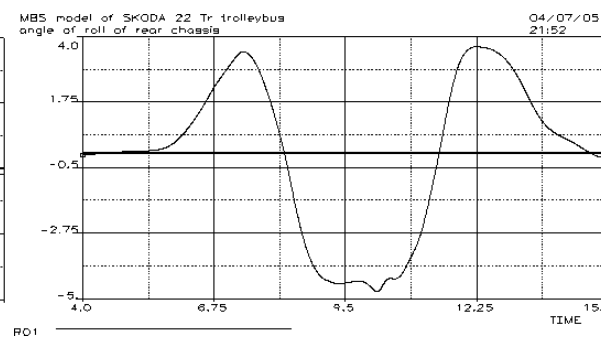
Obr. 6 Časový průběh úhlu natočení volantu při zkušební jízdě č. 1 (převzato ze [3])



Obr. 7 Časový průběh úhlu klopení zadního vozu při zkušební jízdě č. 1 (převzato ze [3])



Obr. 8 Časový průběh úhlu klopení zadního vozu při simulaci zkušební jízdy č. 1 se stabilizátorem

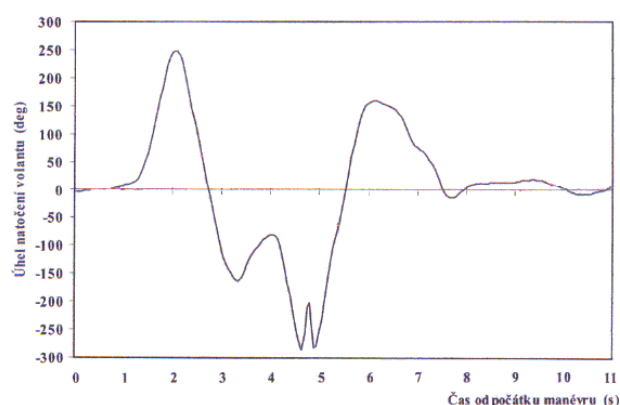


Obr. 9 Časový průběh úhlu klopení zadního vozu při simulaci zkušební jízdy č. 1 bez stabilizátoru

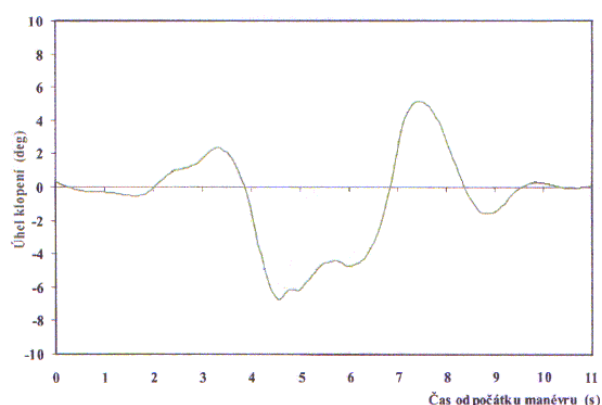
Výsledky simulací zkušební jízdy č. 2 (při rychlosti 40 km/h)

Sledovaná veličina		Extrémy časových průběhů		
		Se stabilizátorem		Bez stabilizátoru
		Experiment	Simulace	
Úhel lomení [deg]	min.	-15.00	-13.72	-13.71
	max.	16.26	15.61	15.80
Boční zrychlení zadního vozu [m/s^2]	min.	-3.17	-5.13	-4.96
	max.	2.83	4.46	4.36
Úhel klopení zadního vozu [deg]	min.	-6.74	-7.70	-9.13
	max.	5.15	6.61	7.30
Torzní deformace kloubového spojení [deg]	min.	neměřeno	-3.51	-3.38
	max.	neměřeno	3.12	3.38
Relativní výchylka pravých zadních pružin [m]	min.	neměřeno	-0.068	-0.074
	max.	neměřeno	0.115	0.147
Relativní výchylka levých zadních pružin [m]	min.	neměřeno	-0.059	-0.065
	max.	neměřeno	0.095	0.115
Vertikální deformace stabilizátoru (vpravo) [m]	min.	neměřeno	-0.057	-
	max.	neměřeno	0.064	-

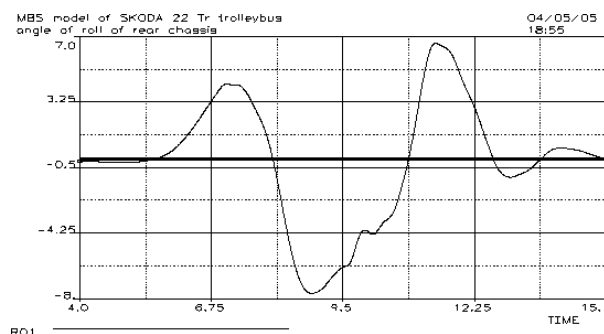
Tab. 2 Extrémní hodnoty sledovaných veličin při zkušební jízdě č. 2



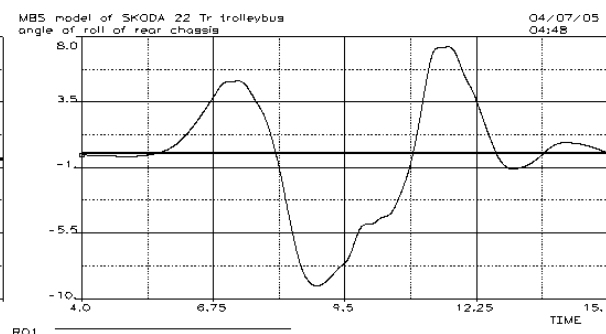
Obr. 10 Časový průběh úhlu natočení volantu při zkušební jízdě č. 2 (převzato ze [3])



Obr. 11 Časový průběh úhlu klopení zadního vozu při zkušební jízdě č. 2 (převzato ze [3])



Obr. 12 Časový průběh úhlu klopení zadního vozu při simulaci zkušební jízdy č. 2 se stabilizátorem

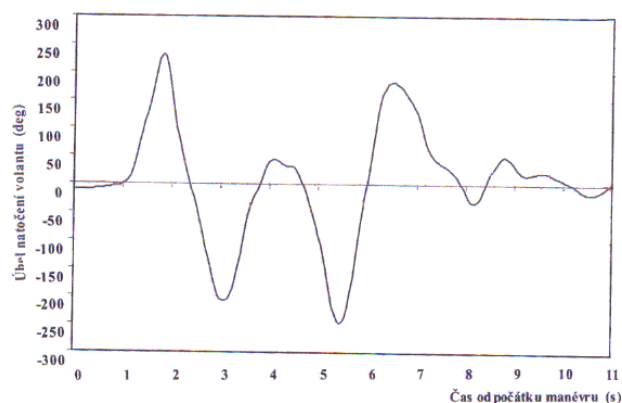


Obr. 13 Časový průběh úhlu klopení zadního vozu při simulaci zkušební jízdy č. 2 bez stabilizátoru

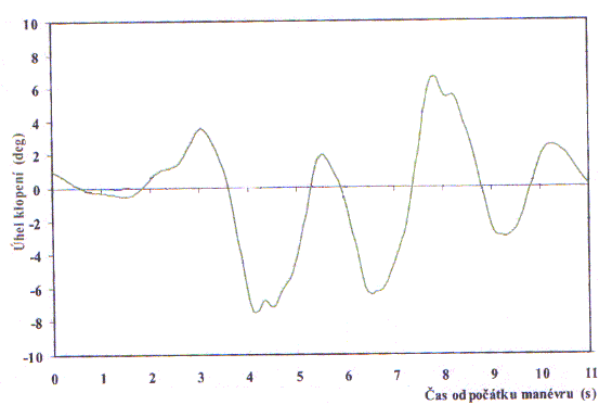
Výsledky simulací zkušební jízdy č. 3 (při rychlosti 45 km/h)

Sledovaná veličina		Extrémy časových průběhů		
		Se stabilizátorem		Bez stabilizátoru
		Experiment	Simulace	
Úhel lomení [deg]	min.	-15.13	-15.40	-15.18
	max.	18.59	15.10	15.05
Boční zrychlení zadního vozu [m/s^2]	min.	-5.17	-5.30	-5.40
	max.	4.90	5.30	5.23
Úhel klopení zadního vozu [deg]	min.	-7.46	-7.66	-8.80
	max.	6.62	7.79	8.94
Torzní deformace kloubového spojení [deg]	min.	neměřeno	-3.81	-4.03
	max.	neměřeno	3.53	3.79
Relativní výchylka pravých zadních pružin [m]	min.	neměřeno	-0.075	-0.080
	max.	neměřeno	0.116	0.142
Relativní výchylka levých zadních pružin [m]	min.	neměřeno	-0.059	-0.065
	max.	neměřeno	0.122	0.149
Vertikální deformace stabilizátoru (vpravo) [m]	min.	neměřeno	-0.066	-
	max.	neměřeno	0.063	-

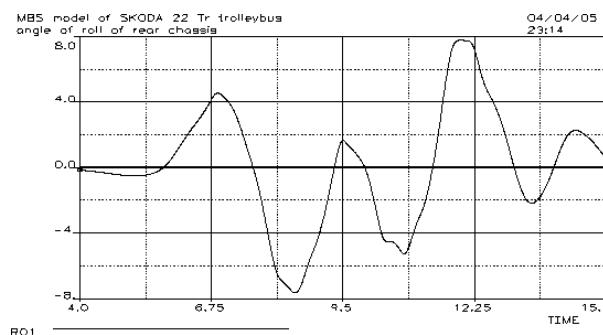
Tab. 3 Extrémní hodnoty sledovaných veličin při zkušební jízdě č. 3



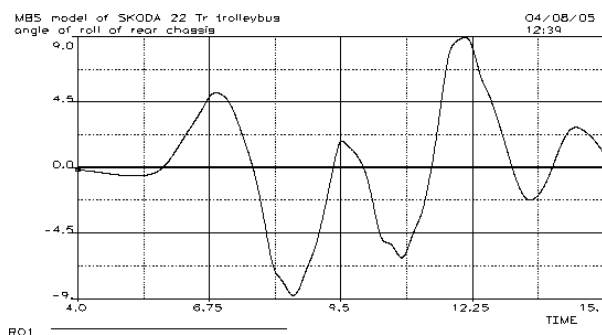
Obr. 14 Časový průběh úhlu natočení volantu při zkušební jízdě č. 3 (převzato ze [3])



Obr. 15 Časový průběh úhlu klopení zadního vozu při zkušební jízdě č. 3 (převzato ze [3])



Obr. 16 Časový průběh úhlu klopení zadního vozu při simulaci zkušební jízdy č. 3 se stabilizátorem

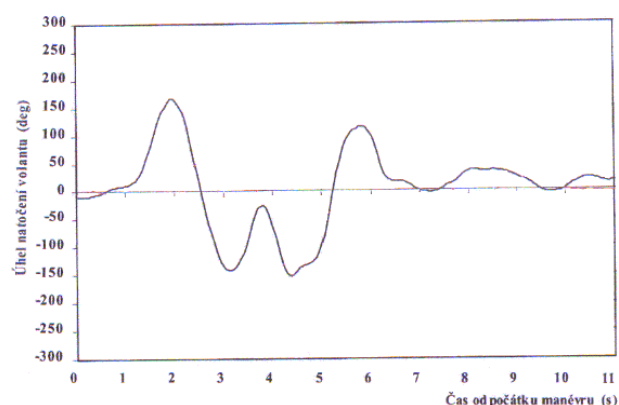


Obr. 17 Časový průběh úhlu klopení zadního vozu při simulaci zkušební jízdy č. 3 bez stabilizátoru

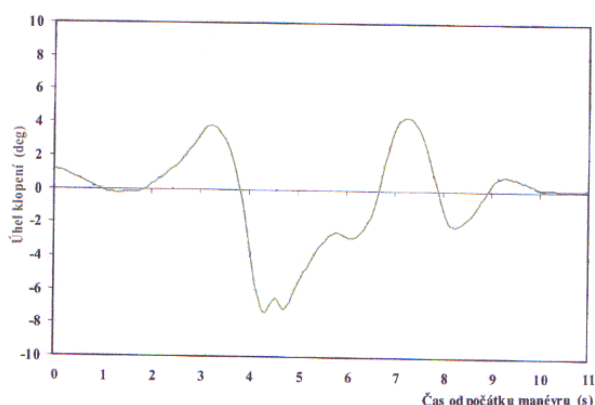
Výsledky simulací zkušební jízdy č. 4 (při rychlosti 50 km/h)

Sledovaná veličina		Extrémy časových průběhů		
		Se stabilizátorem		Bez stabilizátoru
		Experiment	Simulace	
Úhel lomení [deg]	min.	-14.26	-10.53	-10.51
	max.	11.25	11.76	11.45
Boční zrychlení zadního vozu [m/s^2]	min.	-4.39	-4.98	-4.83
	max.	3.34	4.62	4.58
Úhel klopení zadního vozu [deg]	min.	-7.44	-9.34	-10.48
	max.	4.37	5.93	6.37
Torzní deformace kloubového spojení [deg]	min.	neměřeno	-2.84	-3.16
	max.	neměřeno	3.14	3.40
Relativní výchylka pravých zadních pružin [m]	min.	neměřeno	-0.066	-0.072
	max.	neměřeno	0.149	0.178
Relativní výchylka levých zadních pružin [m]	min.	neměřeno	-0.065	-0.070
	max.	neměřeno	0.078	0.095
Vertikální deformace stabilizátoru (vpravo) [m]	min.	neměřeno	-0.050	-
	max.	neměřeno	0.077	-

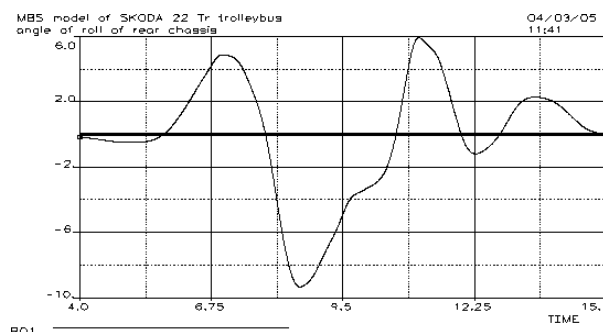
Tab. 4 Extrémní hodnoty sledovaných veličin při zkušební jízdě č. 4



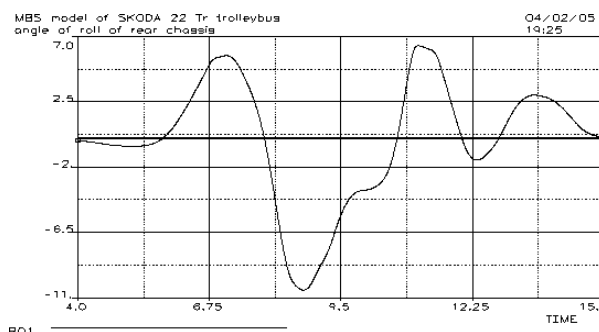
Obr. 18 Časový průběh úhlu natočení volantu při zkušební jízdě č. 4 (převzato ze [3])



Obr. 19 Časový průběh úhlu klopení zadního vozu při zkušební jízdě č. 4 (převzato ze [3])



Obr. 20 Časový průběh úhlu klopení zadního vozu při simulaci zkušební jízdy č. 4 se stabilizátorem

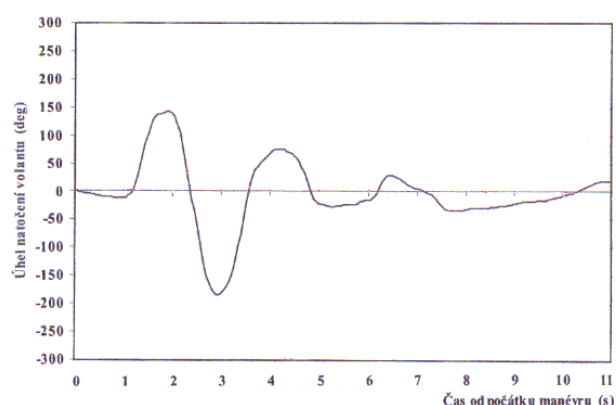


Obr. 21 Časový průběh úhlu klopení zadního vozu při simulaci zkušební jízdy č. 4 bez stabilizátoru

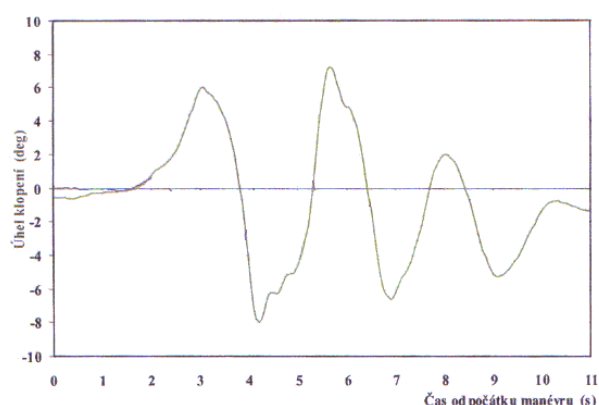
Výsledky simulací zkušební jízdy č. 5 (při rychlosti 55 km/h)

Sledovaná veličina		Extrémy časových průběhů		
		Se stabilizátorem		Bez stabilizátoru
		Experiment	Simulace	
Úhel lomení [deg]	min.	-11.53	-10.85	-10.25
	max.	14.99	15.08	14.84
Boční zrychlení zadního vozu [m/s^2]	min.	-6.5	-5.72	-5.65
	max.	4.76	4.99	4.96
Úhel klopení zadního vozu [deg]	min.	-7.95	-8.92	-10.10
	max.	7.19	5.92	6.57
Torzní deformace kloubového spojení [deg]	min.	neměřeno	-3.70	-3.99
	max.	neměřeno	3.40	3.63
Relativní výchylka pravých zadních pružin [m]	min.	neměřeno	-0.069	-0.075
	max.	neměřeno	0.146	0.177
Relativní výchylka levých zadních pružin [m]	min.	neměřeno	-0.069	-0.074
	max.	neměřeno	0.081	0.101
Vertikální deformace stabilizátoru (vpravo) [m]	min.	neměřeno	-0.050	-
	max.	neměřeno	0.074	-

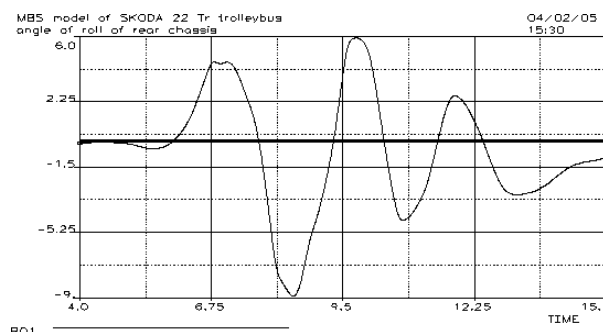
Tab. 5 Extrémní hodnoty sledovaných veličin při zkušební jízdě č. 5



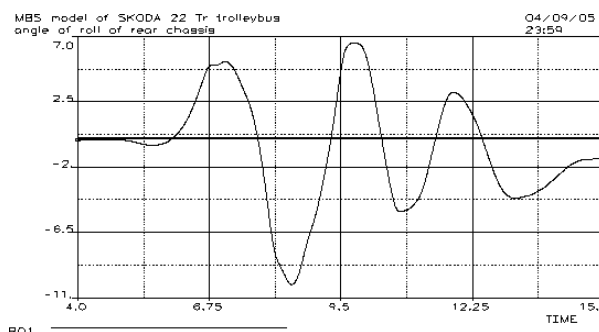
Obr. 22 Časový průběh úhlu natočení volantu při zkušební jízdě č. 5 (převzato ze [3])



Obr. 23 Časový průběh úhlu klopení zadního vozu při zkušební jízdě č. 5 (převzato ze [3])



Obr. 24 Časový průběh úhlu klopení zadního vozu při simulaci zkušební jízdy č. 5 se stabilizátorem



Obr. 25 Časový průběh úhlu klopení zadního vozu při simulaci zkušební jízdy č. 5 bez stabilizátoru

Závěr

Časové průběhy a extrémní hodnoty sledovaných veličin zjištěné při experimentálních měřeních na reálném trolejbusu a při simulacích s multibody modelem nejsou zcela shodné. Odlišnosti jsou jednak způsobeny neznalostí všech podmínek zkušebních jízd potřebných pro přesnější provedení simulací (nejsou zcela známy počáteční podmínky při pořizování záznamů experimentálních měření; např. není známa vzdálenost podvozku zadního vozu a dorazů vypružení zadní nápravy 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 ověření přístupu k návrhu stabilizátoru zadního vozu trolejbusu.

Při simulacích zkušebních jízd s multibody modelem nízkopodlažního trolejbusu ŠKODA 22 Tr s kloubem HÜBNER, hnacími nápravami RÁBA a stabilizátorem 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 modelem trolejbusu bez stabilizátoru. Poklesly extrémní hodnoty časových průběhů úhlu klopení zadního vozu a tím i extrémní hodnoty dalších souvisejících veličin - relativních výchylek vypružení zadní nápravy a torzní deformace kloubového spojení. Při simulovaných jízdách se vlivem stabilizátoru snížily úhly klopení zadního vozu o 10 % až 18 % vzhledem k uvažování vozidla bez stabilizátoru zadního vozu (viz tabulky 1 až 5, obr. 7 až obr. 9, obr. 11 až obr. 13, obr. 15 až obr. 17, obr. 19 až obr. 21 a obr. 23 až obr. 25).

Ze zdokumentovaných průběhů sledovaných veličin při zkušebních jízdách s modernizovaným trolejbusem ŠKODA 22 Tr bez stabilizátoru [4] a se stabilizátorem zadního vozu [3] i z výsledků simulací ([1], [2], [8] a tento příspěvek) je zřejmé, že řidič při zkušebních jízdách s vozidlem se stabilizátorem zadního vozu volil výrazně agresivnější styl jízdy. Je zřejmé, že tento styl jízdy byl umožněn zlepšením jízdních vlastností trolejbusu po provedení montáže stabilizátoru (zkušební jízdy s naloženým trolejbusem bez stabilizátoru [4] musely být z důvodu problematického chování vozidla ukončeny při rychlosti 45 km/h, zkušební jízdy s vozidlem se stabilizátorem [3] až při rychlosti 55 km/h). Důsledkem agresivnějšího stylu jízdy bylo při simulacích zkušebních jízd od rychlosti 40 km/h zaznamenáno překročení povolených deformací stabilizátoru (povolená vertikální deformace je v rozmezí ± 0.061 m) a kloubu HÜBNER (povolená torzní deformace je v rozmezí $\pm 3^\circ$). Při experimentálních měřeních nebyly tyto deformace sledovány. Od rychlosti jízdy 40 km/h zároveň bylo při experimentálních měřeních i při simulacích zkušebních jízd identifikováno 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). Je však nanejvýš pravděpodobné, že při přepravě cestujících s nízkopodlažním trolejbusem ŠKODA 22 Tr s kloubem HÜBNER, hnacími nápravami RÁBA a stabilizátorem zadního vozu v běžném městském provozu bude volen styl jízdy poněkud méně agresivní než při zkušebních jízdách, při kterých bylo zatížení vozidla na pohotovostní hmotnost realizováno rozmístěným zátěžových pytlíků na podlaze.

Je nutné ještě zmínit, že narozdíl od simulací nebylo při zkušebních jízdách s reálným trolejbusem [3] identifikováno překročení maximální pružné deformace kloubového spojení. Lze usuzovat, že v záznamech experimentálních měření se výrazněji projevovaly nárazy způsobené dosednutím podvozku zadního vozu na dorazy zadní nápravy.

Na základě výsledků simulací zkušebních jízd zdokumentovaných ve [3] je možné potvrdit vhodnost přístupu k návrhu konstrukčního řešení stabilizátoru zadního vozu nízkopodlažního kloubového trolejbusu ŠKODA 22 Tr s kloubem HÜBNER a hnacími nápravami RÁBA na zlepšení jeho jízdní stability. Zohlednění skutečnosti, že při zkušebních jízdách docházelo k překročení povolených deformací stabilizátoru a kloubového spojení, je záležitostí případného posouzení těchto konstrukčních částí z hlediska pevnosti a únavové životnosti.

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

Literatura

- [1] Polach, P.: *Experimentálně simulační přístup ke zlepšení jízdní stability nízkopodlažního kloubového trolejbusu ŠKODA 22 Tr* - CD-ROM sborník 42. mezinárodní konference Experimentální analýza napětí 2004, sborník základních příspěvků str. 225-230, Kašperské Hory, 2004, 14 str.
- [2] Polach, P.: *Design of the Rear Carriage Stabilizer of a Low-Floor Articulated Trolleybus* - CD-ROM Proceedings of 21st International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, Abstracts Book p. 321, Warsaw, 2004, 2 p.
- [3] *Protokol č. 40404-02, Posouzení ovladatelnosti a jízdní stability trolejbusu Škoda 22 Tr* - L16 Laboratoř ovladatelnosti a jízdního pohodlí, Ústav pro výzkum motorových vozidel, Praha, 2002, 9 str.
- [4] *Protokol č. 40103-02 - L16 Laboratoř ovladatelnosti a jízdního pohodlí*, Ústav pro výzkum motorových vozidel, Praha, 2002, 10 str.
- [5] 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, Book of Abstracts not paged, Lisbon, 2003, 16 p.
- [6] 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
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] *alaska, User Manual, Version 2.3* - Institute of Mechatronics Chemnitz, 1998
- [10] Shampine, L. F. – Gordon, M. K.: *Computer-Lösung gewöhnlicher Differentialgleichungen* - Friedrich Vieweg & Sohn Braunschweig/Wiesbaden, 1984