

COMPUTING EVALUATION OF THE VEHICLE LOAD INFLUENCE ON ITS STEADY STATE AND TRANSIENT DIRECTIONAL BEHAVIOUR

J. Socha*

Summary: *The contribution deals with the mathematical modelling in the field of vehicle directional behaviour. The complex model of the bus has been created to analyse its directional properties using computer simulations. Driving of the bus model along a given track is ensured by model of driver behaviour. Mathematical model has been validated using the comparison with measurements of real bus steady state and transient directional behaviour. After model validation the attention has been devoted to the bus model behaviour at various load cases. Vehicle properties have been evaluated within the steady state circle run and during the response on step input to steering wheel as well with respect to relevant ISO standards. The performed simulations describe bus directional properties and show their sensitivity to vehicle load distribution.*

1. Úvod

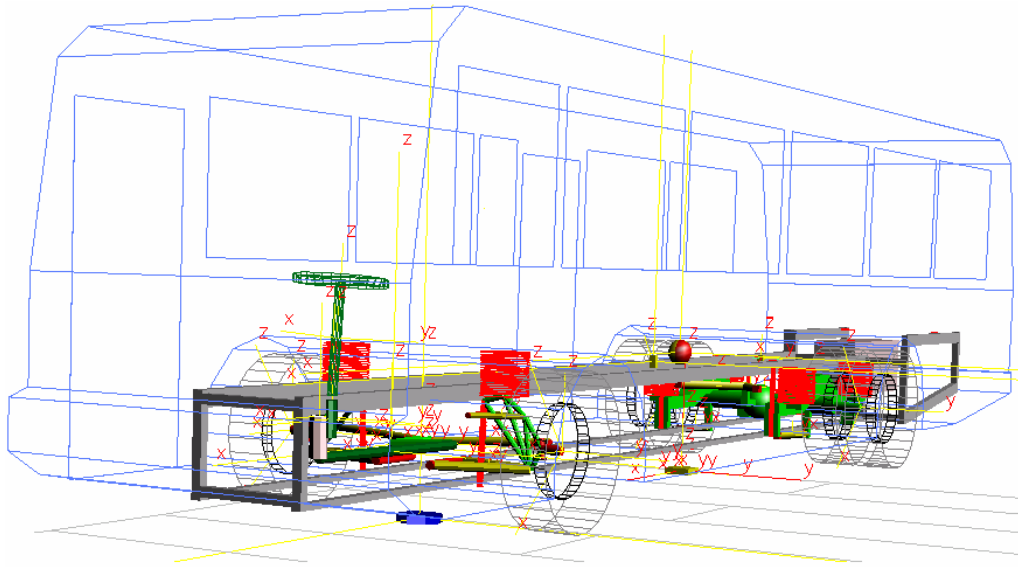
Spolu s rostoucími požadavky na výkon vozidel rostou nároky, kladené na úroveň jejich aktivní a pasivní bezpečnosti. S mírou aktivní bezpečnosti je úzce spojena oblast směrového chování vozu. Chování vozidla lze hodnotit prostřednictvím experimentů nebo cestou výpočtů. Každý z uvedených přístupů má své přednosti a své nevýhody, lze však říci, že současným trendem je neustálé zvyšování podílu výpočetních postupů při vývoji vozidel. Tuto skutečnost dokumentuje také mnohdy již uskutečněný nebo očekávaný průnik různých výpočetních metod do legislativních postupů schvalování vozidel. Při popisu ustáleného a přechodového směrového chování vozu výpočetní cestou lze s výhodou využít prostředí vyspělých simulačních systémů. Příspěvek představuje výstupy simulací, jejichž cílem bylo ověřit citlivost směrových vlastností autobusu na způsob jeho obsazení.

2. Základní rysy modelu vozidla

V prostředí systému SIMPACK, který patří mezi současné standardy v oblasti modelování soustav mnoha těles, byl vytvořen prostorový model linkového autobusu (obrázek 1). Kinematická struktura modelu je tvořena substrukturami vedení kol (lichoběžníkové závěsy vpředu, tuhá náprava vzadu) a modelem odpérováných hmot. Model vozu je složen z 38 tuhých těles a tvoří soustavu s 19 stupni volnosti. Substruktura tuhé zadní nápravy je doplněna o model stálého převodu a diferenciálu. Časový průběh otáček případně kroutícího momentu v soustavě pohonu lze v prostředí modelu definovat prostřednictvím rheonmní vazby na výstupu z převodovky.

* Ing. Jiří Socha, Ph.D., Ústav pro výzkum motorových vozidel s.r.o.,
 Lihovarská 12, 180 68 Praha 9, tel: +420 266 310 679, e-mail: socha@uvmv.cz

Silové prvky v soustavě modelují vlastnosti systému pérování vozu (vzduchové vaky, hydraulické tlumiče, pryžové dorazy), uložení agregátu a pneumatik. Deformační charakteristika vzduchových vaků je nelineární s progresivním průběhem, byla odvozena ze statické zatěžovací charakteristiky vaku a je doplněna o charakteristiku pryžového dorazu. Silové modely hydraulických tlumičů pracují s nelineárními rychlostními charakteristikami. Popis vlastností pneumatik využívá Pacejkovu podobnostní aproximační metodu, dostupným zdrojem vstupních dat pro definici potřebných parametrů modelu pneumatiky byly naměřené průběhy závislosti boční síly a vratného momentu na úhlu směrové úchyly pneumatiky.



Obrázek 1: Celkový pohled na model autobusu

Protože cílem simulací bylo ověřit citlivost směrového chování vozu na velikost jeho zatížení a na způsob rozložení tohoto zatížení ve voze (Mitschke 1990), byl model vozu ve stavu pohotovostní hmotnosti označen jako varianta obsazení A a vytvořeny byly další tři varianty obsazení autobusu:

- obsazení B: užitečné zatížení autobusu rovnoměrně rozložené po celém interiéru vozu
- obsazení C: polovina užitečného zatížení autobusu soustředěná v přední části vozu
- obsazení D: polovina užitečného zatížení autobusu soustředěná v zadní části vozu

Jednotlivé varianty obsazení autobusu jsou v prostředí simulačního systému vytvořeny připojením dalšího tělesa (reprezentujícího příslušný způsob zatížení) k modelu odpérováných hmot vozu ve stavu pohotovostní hmotnosti.

3. Model chování řidiče

Pro simulace chování vozu při jízdách zkouškách, během nichž tvoří soustava řidič - vozidlo - jízdní dráha uzavřenou regulační smyčku, bylo třeba doplnit model vozidla o model chování řidiče, který povede model vozu po předepsané jízdní dráze. Pozornost byla věnována zjednodušenému případu, při němž je třeba vést model vozu po předepsané trajektorii a zanedbány jsou rysy chování skutečného řidiče (tzv. rukopis řidiče reprezentovaný např. jeho reakční dobou). Obvyklý přístup k řešení představuje rovnice (1), kterou uvádí například Young et al. (1995):

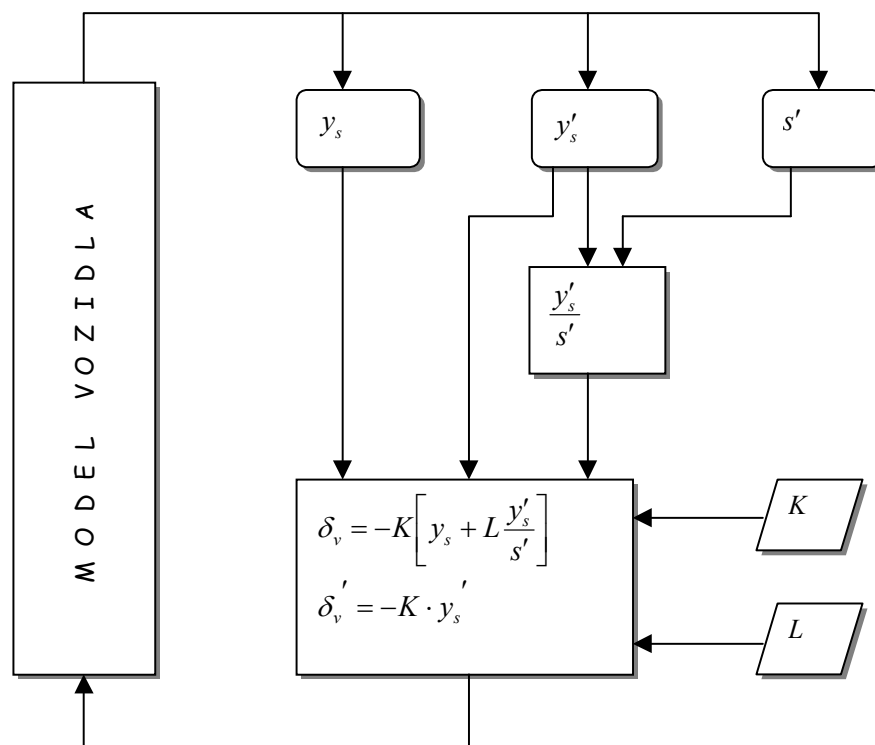
$$T_r \cdot \delta'_f(t) + \delta_f(t) = -K \left[y_s(t) + \frac{L}{v_x} y'_s(t) \right] \quad (1)$$

Rovnice (1) je rovnicí proporcionálně derivačního regulátoru, δ_f [rad] je natočení předních kol vozu, y_s [m] boční odlehlost od předepsané trati, K [rad/m] zesílení regulátoru a poměr L/v_x [s] časová konstanta derivační složky. Proměnné, obsažené v rovnici, mají také svůj fyzikální význam. T_r [s] je časová konstanta, reprezentující odezvu řidiče, L [m] je vzdálenost, na kterou řidič sleduje vozovku, a v_x [m/s] je dopředná rychlost vozu.

Ponechme stranou chování skutečného řidiče (reprezentované časovou konstantou jeho odezvy T_r [s]) a zabývejme se regulačním obvodem, který zajistí vedení vozu po předepsané trati při dostatečné jakosti regulace. Nahradíme-li v rovnici (1) natočení předních kol potřebným natočením volantu $\delta_v(t)$ (s ohledem na strukturu modelu autobusu) a dopřednou rychlost vozu $v_x(t)$ zapíšeme jako $s'(t)$ (pokud je $s(t)$ souřadnicí, popisující polohu vozu na trati), získáme za předpokladu, že druhé časové derivace podélné a boční souřadnice polohy vozu na trati lze považovat za blízké nule, pro potřebné natočení volantu a jeho první časovou derivaci výrazy

$$\begin{aligned} \delta_v(t) &= -K \left[y_s(t) + \frac{L}{s'(t)} y'_s(t) \right] \\ \delta'_v(t) &= -K \cdot y'_s(t) \end{aligned} \quad (2)$$

Na základě těchto vztahů vznikl řídicí obvod (obrázek 2), který je schopen v každém časovém kroku ze tří vstupních signálů určit potřebné natočení a rychlost natáčení volantu.



Obrázek 2: Struktura řídicí smyčky náhradního modelu chování řidiče.

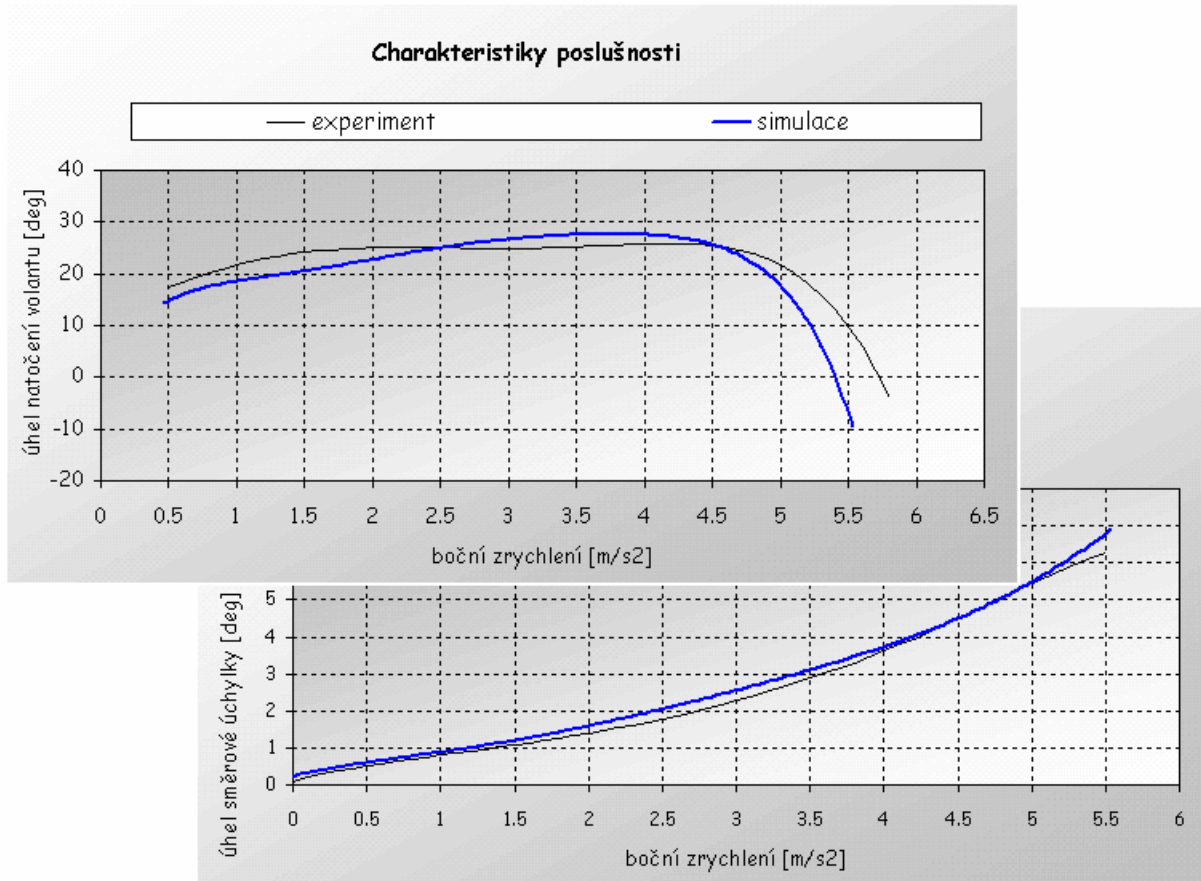
Hodnoty boční odlehlosti vozu od předepsané dráhy (sledované ve středu přední nápravy) a její první časové derivace vstupují v každém časovém kroku numerické integrace do řídicí smyčky jako hodnoty, popisující stav v explicitní vazbě, definované mezi odpérovanou hmotou a předepsanou trajektorií. Také hodnotu rychlosti jízdy vozu lze odečíst z poměrů v této vazbě. Vzdálenost, na kterou řidič hodnotí poměry na vozovce ("dohled řidiče") pokládáme za konstantu, stejně jako zesílení regulátoru. Kriteřiem pro jejich nastavení se stala jakost regulačního pochodu.

Z metod syntézy regulačních obvodů byla zvolena metoda Ziegler - Nichols (Kubík a kol. 1982) která nevyžaduje znalost analytického popisu regulované soustavy. Při určování kritického zesílení byly provedeny simulace, při nichž se model vozu pohyboval konstantní rychlostí, předepsanou dráhu tvořil přímý úsek. Při postupném zvyšování parametru K byla určena mez stability obvodu. Simulace byly provedeny pro všechny čtyři varianty obsazení vozu vždy pro rychlost jízdy 10 m/s a určily příslušná kritická zesílení (hodnoceným výstupem byl úhel natočení volantu). Z výstupů simulací pro jednotlivé stavy obsazení byla určena kritická zesílení K_{krit} a odečteny periody kmitů T_{krit} regulačních pochodů na mezi stability. Z nich byly určeny parametry regulátoru.

4. Chování modelu vozu, srovnání s výstupy experimentů

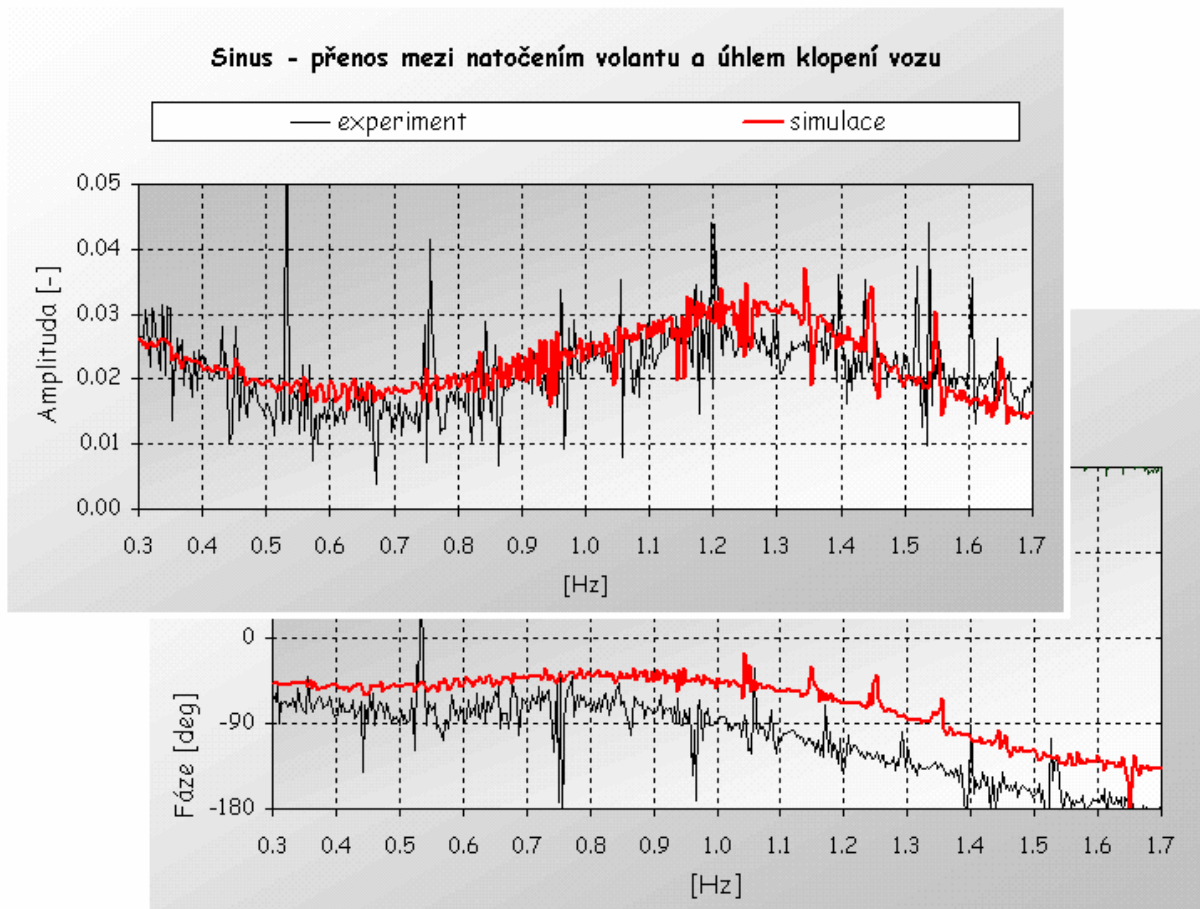
Před vlastním využitím modelu autobusu bylo jeho směrové chování v základních jízdních stavech porovnáno s výstupy experimentů. Hodnoceno bylo chování modelu v ustálených (jízda po kruhové dráze) i přechodových stavech (odezva vozu na sinus natáčení volantu). K validaci modelu byla využita měření, provedená Laboratoři ovladatelnosti a jízdního pohodlí ÚVMV, s.r.o. Uvedená měření probíhala s autobusem ve stavu pohotovostní hmotnosti. Při zkouškách byl vůz vybaven stabilizovanou plošinou pro měření bočního zrychlení, úhlu klopení a úhlové rychlosti stáčení vozidla, zařízením Corsys pro měření úhlu směrové úchylky a zařízením, umožňujícím řidiči natáčet volant podle zadaného harmonického průběhu. Vůz byl vybaven také snímačem úhlu natočení volantu.

Ustálené jízdní stavy vozu byly v souladu se standardem ISO hodnoceny při jízdě po kruhové dráze. Použitá metodika experimentů i simulací vychází z varianty plynulého zvyšování rychlosti na kruhové dráze o konstantním poloměru. Rychlost vozu je plynule zvyšována z nulové hodnoty, volant je natáčen tak, aby vozidlo stále sledovalo vyznačenou kruhovou dráhu (při simulacích byl vůz veden náhradním modelem chování řidiče). Výstupy zkoušky tvoří časové průběhy natočení volantu a bočního zrychlení vozu, z nichž lze generovat charakteristiku poslušnosti. Dalšími výstupy byly časové průběhy úhlu klopení a úhlu směrové úchylky předního kola vozu. Ze zmíněných časových průběhů byly generovány kvazistatické charakteristiky vozu v podobě, která je obvyklá pro hodnocení směrového chování vozu při ustálené jízdě v kruhu (obrázek 3). Charakteristiky poslušnosti vozu získané experimentem a simulací se shodují v charakteru průběhu i v hodnotách potřebného natočení volantu. Při nízkých hodnotách bočního zrychlení (\sim do $1,5 \text{ m/s}^2$) obě charakteristiky ukazují nedotáčivé chování vozu. Ve střední části obou charakteristik poslušnosti (interval bočního zrychlení $<2,5 ; 4> \text{ m/s}^2$) se autobus chová neutrálně, při bočních zrychlení nad 4 m/s^2 je chování skutečného vozu i modelu přetáčivé s tendencí k přetáčivosti. Shodné jsou také nelineární závislosti úhlu směrové úchylky vnějšího předního kola na bočním zrychlení (obr.5). Matematické simulace s odladěným modelem popisují směrové chování vozu v ustálených stavech na kruhové dráze stejně, jako experimenty se skutečným autobusem.



Obrázek 3: Charakteristiky poslušnosti a závislosti úhlu směrové úchyly vnějšího předního kola vozu na dostředivém zrychlení na výstupu experimentu a simulace.

Přechodové jízdní stavy byly hodnoceny prostřednictvím odezvy na sinus natáčení volantu vozu při konstantní rychlosti jízdy. Při jízdě rychlostí 80 km/h byl volant vozu při experimentu i simulaci natáčen tak, že časový průběh natočení měl podobu vln sinus konstantní frekvence a amplitudy. Amplituda natáčení volantu byla při experimentech i simulacích 55 stupňů, frekvence se při jednotlivých jízdách (simulacích) měnila s krokem 0,1 Hz v intervalu $\langle 0,3 ; 1,7 \rangle$ Hz. Při experimentu byl příslušný sinus signál dané amplitudy a frekvence přiveden na měřicí volant a zkušební řidič natáčením volantu sledoval generovanou světelnou stopu. Při simulacích byl model chování řidiče v modelu autobusu "odstaven". Na vstupu do převodky řízení byla definována rheonomní rotační vazba, natočení ve vazbě bylo dáno časovým průběhem sinus příslušné konstantní amplitudy a frekvence. Mezi sledované výstupy během zkoušek i simulací patřily časové průběhy úhlu natočení volantu, bočního zrychlení vozidla, úhlu klopení vozidla, úhlu a úhlové rychlosti stáčení vozidla a směrové úchyly levého předního kola. Protože validace modelu sledováním časové odezvy není v tomto případě příliš vhodná (charakter sledovaných průběhů), byly výstupní časové průběhy využity ke generaci frekvenčních charakteristik. Získány byly přenosy mezi natáčením volantu a sledovanými výstupy. Pozornost je vhodné věnovat amplitudové části přenosu mezi natáčením volantu a úhlem klopení vozu (obrázek 4). Zmíněný průběh dosahuje lokálního maxima v okolí frekvence 1,3 Hz. Tato informace je zajímavá zejména s ohledem na hodnocení stability vozidla proti převrácení.

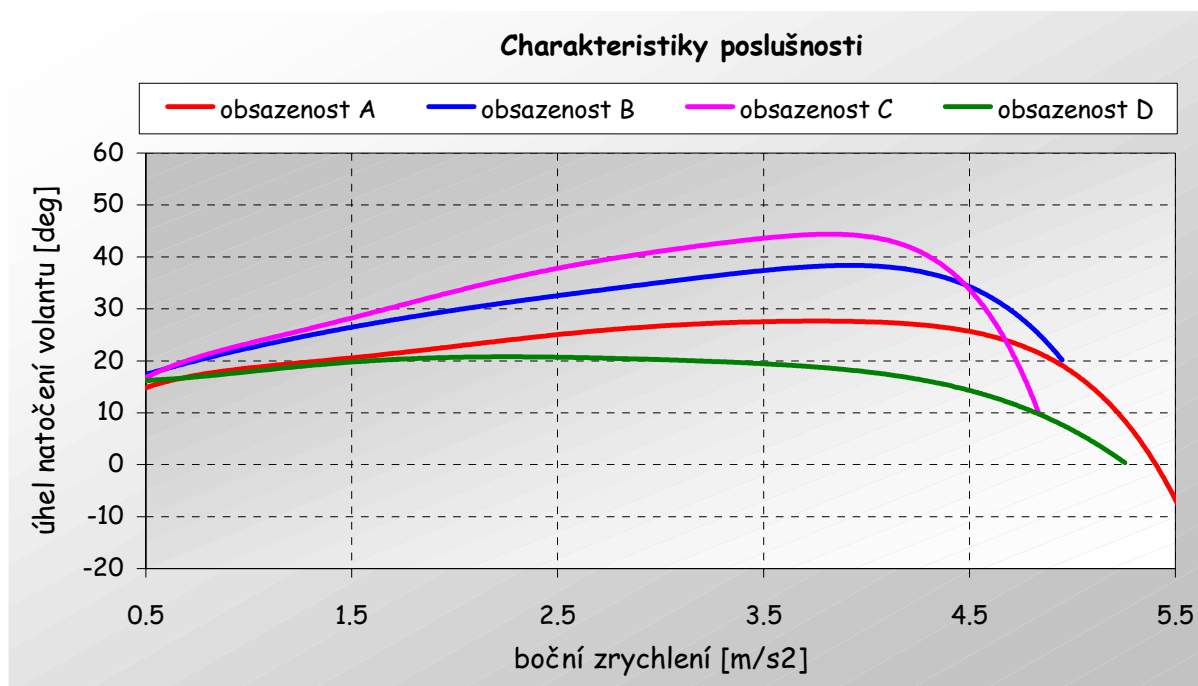


Obrázek 4: Přenos mezi natočením volantu a úhlem klopení vozu na výstupu experimentů a simulací.

Časové průběhy na výstupu experimentů i simulací a získané přenosy shodně hodnotí směrové chování vozu ve sledovaném jízdním stavu. Amplitudové charakteristiky přenosů získaných ze simulací se shodují s charakteristikami, získanými experimentálně. Obecným rysem fázových charakteristik přenosů získaných simulacemi je menší fázové zpoždění sledovaných výstupů za vstupem do soustavy.

5. Směrové chování vozu při různém obsazení

Simulace ustálené jízdy po kruhové dráze s autobusem obsazeným podle variant B, C, a D probíhaly podle metodiky, použité při validaci modelu. Z výstupních časových průběhů byly vytvořeny závislosti ostatních sledovaných veličin na bočním zrychlení v těžišti vozu. Charakteristiky poslušnosti variant B a C (obrázek 5) neobsahují střední část neutrálního chování (v intervalu zrychlení $\langle 2,5 ; 4 \rangle \text{ m/s}^2$), kterou lze zaznamenat u vozu ve stavu pohotovostní hmotnosti. Při těchto variantách obsazení je úvodní část charakteristik s nedotáčivým chováním strmější, toto nedotáčivé chování s tendencí k přetáčivosti však přechází k chování přetáčivému (už při hodnotách bočního zrychlení $\sim 3,5 \text{ m/s}^2$) bez výraznějšího úseku s neutrálním chováním. Charakteristika poslušnosti varianty obsazení D nevykazuje nedotáčivé chování ani při nižších hladinách bočního zrychlení, pro zrychlení do 3 m/s^2 lze chování hodnotit jako neutrální, nad touto hodnotou je vozidlo přetáčivé s tendencí k přetáčivosti.

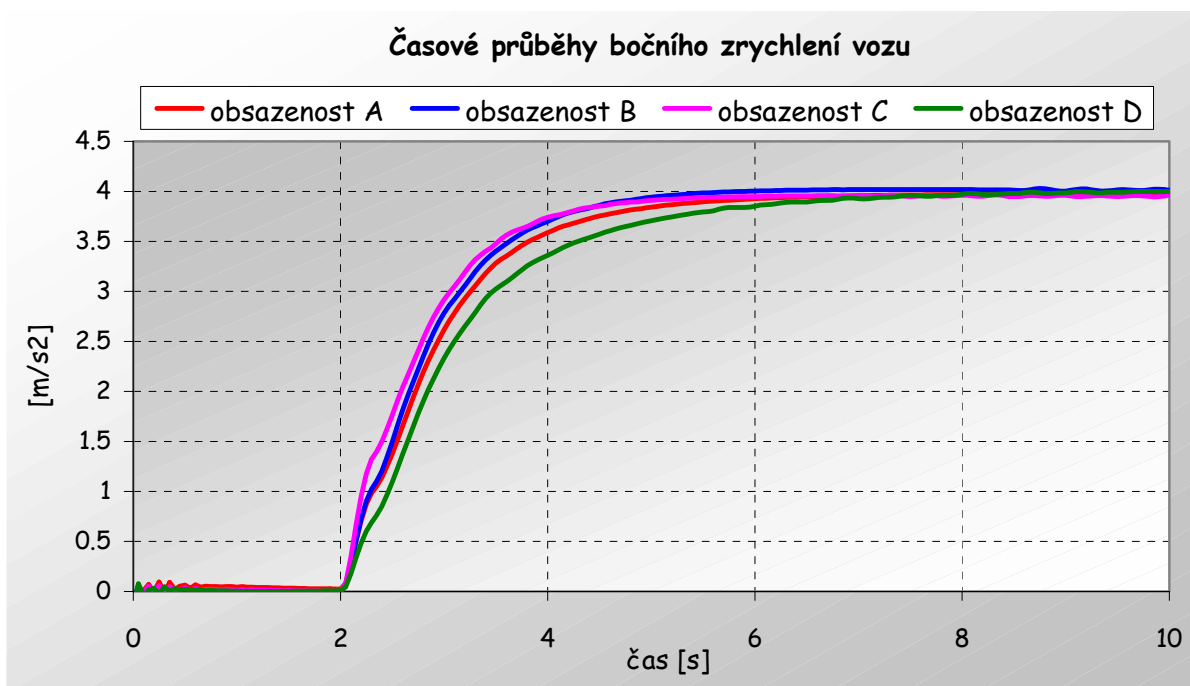


Obrázek 5: Charakteristiky poslušnosti pro různé stavy obsazení vozu

Průběhy úhlu směrové úchyly těžiště vozu se pro jednotlivé varianty obsazení mírně liší, hodnoty úhlu s rostoucím bočním zrychlením klesají nelineárně z kladných hodnot (~ 3 deg), nulové hodnoty dosahuje úhel směrové úchyly těžiště při hladině bočního zrychlení ~ 4 m/s², pro vyšší zrychlení je směrová úchyly těžiště vozu záporná (podélná poloha okamžitého středu otáčení vozu před těžištěm). Uvedené výstupy simulací ustálené jízdy po kružnici umožňují posoudit citlivost směrového chování vozu v ustálených stavech na způsob jeho obsazení. Charakteristiky poslušnosti ukazují, že potřebné natočení volantu pro projetí dané kruhové dráhy leží v závislosti na dosaženém bočním zrychlení (tedy na rychlosti průjezdu) a způsobu obsazení vozu v intervalu s šířkou 55 stupňů (+45 a -10 stupňů od nuly na obrázku 5). Vezmeme-li v úvahu, že nula na ose závisle proměnné v charakteristikách poslušnosti na obrázku 5 představuje natočení volantu ~ 270 stupňů, je třeba hledat potřebnou polohu volantu v závislosti na rychlosti průjezdu a obsazení vozu v intervalu $\langle 260; 315 \rangle$ stupňů. Protože model autobusu je složen z dokonale tuhých těles a neuvažuje vůle, je zřejmě šířka tohoto intervalu u skutečného vozu (a s ní související nároky na aktivitu řidiče) vyšší.

Přechodové chování modelu autobusu v jednotlivých stavech obsazení bylo hodnoceno prostřednictvím parametrů, charakterizujících odezvu vozidla na skokové natočení volantu (v souladu se standardem ISO 7401). Velikost skokového natočení volantu je pro danou rychlost jízdy dána požadovanou hodnotou bočního zrychlení, dosaženou v průběhu odezvy v těžišti vozu. Ta má být blízká hodnotě 4 m/s² při rychlosti jízdy 80 km/h. Rychlost natáčení volantu při skokovém impulsu je dána intervalem $\langle 200, 500 \rangle$ deg/s. Odezva modelu autobusu byla hodnocena při simulacích přechodového stavu o délce trvání 10 s (zatočení vlevo), přičemž skokový impuls vstoupil do mechanismu řízení v čase 2 s. Model chování řidiče do vedení vozu nezasahoval, natočení volantu bylo dáno časovým průběhem v rheonmní vazbě na vstupu do převodky řízení.

Sledovanými výstupy byly časové průběhy bočního zrychlení v těžišti vozu, úhlové rychlosti stáčení vozu, úhlu klopení vozu a úhlu směrové úchylky těžiště vozu. Přechodová odezva bočního zrychlení (obrázek 6) má pro všechny varianty obsazení autobusu aperiodický průběh s výslednou hodnotou v ustáleném stavu blízkou 4m/s^2 . Zajímavým prvkem odezvy bočního zrychlení, který není v ostatních průbězích (úhlová rychlost stáčení, úhel klopení, úhly směrových úchylek) výrazný, je mírný zlom závislosti v časovém okamžiku dosažení požadované hladiny natočení volantu (v tomto případě v čase 2,3 s od počátku simulace). Jde o rys, který se podle Mastinu, G. et al. (1994) objevuje i na měřených průbězích odezvy bočního zrychlení vozidla.



Obrázek 6: Skokové natočení volantu pro různé stavy obsazení vozu

Doby odezvy bočního zrychlení vozu (obrázek 6, T_{a_y} v tabulce 1) se pro jednotlivé varianty obsazení liší. S nejkratší dobou odezvy bočního zrychlení reaguje na impuls do volantu vůz s obsazením C. Následuje varianta obsazení B, po ní varianta obsazení A. S nejdelší dobou odezvy reaguje vůz, obsazený podle varianty D. Stejně pořadí platí i pro doby odezvy úhlové rychlosti stáčení vozu T_{Ω} . Krátká doba odezvy (rychlá reakce vozidla) na skokový impuls do řízení je většinou spojena s výraznějším gradientem nedotáčivosti v charakteristice poslušnosti. Závěry simulací jsou v souladu s touto relací mezi přechodovou odezvou a ustáleným chováním vozu. Pořadí reakčních dob jednotlivých variant obsazení (od nejkratší po nejdelší) je zároveň pořadím hodnot gradientů nedotáčivosti (od největšího k nejmenšímu) úvodních částí charakteristik poslušnosti pro boční zrychlení do 3m/s^2 .

Také průběhy odezvy úhlové rychlosti stáčení vozu mají pro všechny způsoby obsazení aperiodický charakter, výsledné hodnoty v ustálených stavech se však pro jednotlivé varianty liší. Patrná je souvislost mezi dobou odezvy bočního zrychlení (případně úhlové rychlosti stáčení) vozu a velikostí natočení volantu, potřebnou k dosažení požadované hladiny bočního zrychlení (Mastinu, G. et al. 1994). S rostoucí reakční dobou vozidla potřebná velikost

skokového natočení volantu klesá. Zisk úhlové rychlosti stáčení v ustáleném stavu $((\Omega / \delta_v)_{ss})$ potom naopak roste. Tabulka 1 shrnuje parametry, hodnotící přechodovou odezvu vozu v jednotlivých stavech obsazení. Aperiodický charakter přechodové odezvy (ve všech variantách obsazení) bez překmitu neumožňuje určit TB faktor vozidla (nelze určit $T_{\Omega, max}$). Obecným rysem přechodové odezvy vozidla, který se projevuje i na výstupech provedených simulací, je pomalejší odezva bočního zrychlení vozu na impuls do řízení ve srovnání s odezvou úhlové rychlosti stáčení vozidla.

Tabulka 1: Parametry přechodové odezvy vozu v jednotlivých stavech obsazení¹.

| Parametr | Symbol | Jednotka | Varianta obsazení | | | |
|---|----------------------------|----------|-------------------|-------|-------|-------|
| | | | A | B | C | D |
| Zisk úhlové rychlosti stáčení v ustáleném stavu | $(\Omega / \delta_v)_{ss}$ | s^{-1} | 0,135 | 0,116 | 0,107 | 0,151 |
| Doba odezvy bočního zrychlení vozu | T_{a_y} | s | 1,8 | 1,65 | 1,45 | 2,4 |
| Doba odezvy úhlové rychlosti stáčení vozu | T_{Ω} | s | 1,25 | 1,0 | 0,85 | 1,85 |

6. Závěr

Příspěvek představuje výstupy matematických simulací s prostorovým modelem autobusu, jejichž cílem je posoudit citlivost směrových vlastností modelovaného vozidla na velikost jeho obsazení a způsob rozmístění cestujících v interiéru vozu. Analyzováno je ustálené směrové chování i přechodová odezva vozu ve čtyřech zvolených stavech obsazení.

Závěry simulací ustálené jízdy po kruhové dráze s modelem autobusu v jednotlivých stavech obsazení umožňují kvantifikovat požadavky na aktivitu řidiče při průjezdu oblouku o daném poloměru v závislosti na způsobu obsazení vozu a rychlosti průjezdu. Analýza přechodového chování vozidla při hodnocení odezvy na skokové natočení volantu ve sledovaných stavech obsazení ukazuje, že aperiodický charakter odezvy se s obsazením vozu nemění, způsob obsazení však výrazně ovlivňuje reakční dobu vozu.

7. Literatura

- Kubík, S., kol. (1982) *Teorie automatického řízení I., Lineární a nelineární systémy*, SNTL, Praha.
- Mastinu, G. et al. (1994) Integrated Controls of Lateral Vehicle Dynamics, *Vehicle System Dynamics* 23.
- Mitschke, M. (1990) *Dynamik der Kraftfahrzeuge, Band C - Fahrverhalten*, Springer Verlag Berlin.
- Young, H. Cho; Kim, J. (1995) Design of Optimal Four-Wheel Steering System, *Vehicle System Dynamics* 24.
- ISO 4138 (1996) *Passanger cars - Steady - state circular driving behaviour - Open - loop test procedure*.
- ISO 7401 (1988) *Road vehicles - Lateral transient response test methods*.

¹ tabulka vychází z hodnocení přechodové odezvy podle ISO 7401, index "ss" označuje ustálený stav