

DYNAMICKÉ CHOVÁNÍ VOZIDLA S NEPŘÍMOU VAZBOU SKŘÍNÍ

DYNAMIC BEHAVIOR OF ARTICULATED VEHICLE WITH INDIRECT CONNECTION OF ADJACENT SECTIONS

Jan PLOMER¹, Josef KOLÁŘ²

Abstrakt

Článek přibližuje dílčí výsledky zkoumání dynamického chování dvoučlankového vozu využívajícího společný třínápravový podvozek. To bylo zkoumáno z hlediska stability jízdy ve vyšších rychlostech, kompatibility s mostními konstrukcemi, příčné dynamiky ve vozidle při vjezdu do oblouku a z hlediska silových účinků v kontaktu kolo–kolejnice.

Klíčová slova

D-DART, společný třínápravový podvozek, nepřímá vazba skříní, dynamické chování, stabilita, komfort, kompatibilita s mosty

Abstract

In this article are described partial results of analysis of the dynamic behavior of two-section coach with common 3-axle bogie. The analysis is focused on running stability at higher speeds, compatibility with bridges, lateral dynamics in curve transition and forces caused in wheel–rail contact

Keywords

D-DART, common 3-axle bogie, indirect articulation, dynamic behavior, running stability, comfort in curve transition, bridge compatibility

1 ÚVOD

Koncept společného třínápravového podvozku pro članková vozidla nazvaný *D-DART* se vyznačuje možností výrazného prodloužení vozových skříní při zachování koncepce se společnými podvozky. Toho je dosaženo jednak vyšší únosností třínápravového podvozku, ale také speciální kinematikou průjezdu obloukem, která vyžaduje eliminaci mezičlankového kloubu, kterým jsou obvykle članková vozidla se společnými podvozky spojena. Toto nové kinematické uspořádání dává nové možnosti stran lepšího využití objemu soupravy, nižší měrné hmotnosti aj., ale také vyvolává řadu otázek, jak se takovéto volné spojení skříní bude chovat dynamicky.

¹ Ing. Jan Plomer, ČVUT v Praze, Fakulta strojní. Doktorand, t.č. zaměstnán u Siemens Mobility s.r.o. Kontakt: Ondříčkova 482/18, 360 01 Karlovy Vary. Tel.: +420 606 774 178, e-mail: jan.plomer@fs.cvut.cz

² doc. Ing. Josef Kolář, CSc., ČVUT v Praze, Fakulta strojní. Technická 4, 166 07 Praha 6 – Dejvice. Tel.: +420 224 352 493, e-mail: josef.kolar@fs.cvut.cz

2 ZKOUMANÉ VOZIDLO

2.1 Vozidlo

Pro výzkum dynamického chování vozidla využívající podvozek *D-DART* byla zvolena nejjednodušší konfigurace článkového vozidla, tedy dvoučlánekové vozidlo s jedním předmětným, společným podvozkem. Konkrétně se jedná o dvoupodlažní dvoučlánekový vůz pro dálkovou dopravu, který je ilustrativně vyobrazen na obr. 1 a jeho základní parametry jsou shrnuty v tab. 1.



Obr. 1 Ilustrativní vyobrazení zkoumaného vozidla

Tab. 1 Základní parametry zkoumaného vozidla

Max. rychlost	[km/h]	200
Počet sedadel	[ks]	272
Délka	[m]	51,2
Šířka	[m]	2.80
Vzdálenost středů podvozků	[m]	2 x 22,0
Vzdálenost otočných bodů (kin.)	[m]	19.6
Hmotnost	[t]	82
Max. nápravové zatížení	[kN]	177
Traťová třída	-	B2

2.2 Pojezd

Pojezd zkoumaného vozidla je tvořen dvěma standardními dvounápravovými podvozky a jedním společným třinápravovým podvozkem.

Krajní podvozky jsou běžné konstrukce typické pro dvoupodlažní vozy – vnější rám, vedení dvojkolí kyvnými rameny, primární vypružení nad nápravovými ložisky, vzduchové sekundární vypružení, tlumiče svislých pohybů v obou stupních vypružení, v sekundárním stupni vypružení navíc tlumiče příčných a vrtivých pohybů, zprogresivnění příčné tuhosti pomocí pružných dorazů, tuhé příčné dorazy s proměnnou vůlí v závislosti na natočení podvozku. Vybrané parametry krajních podvozků jsou shrnuty v tabulce 2.

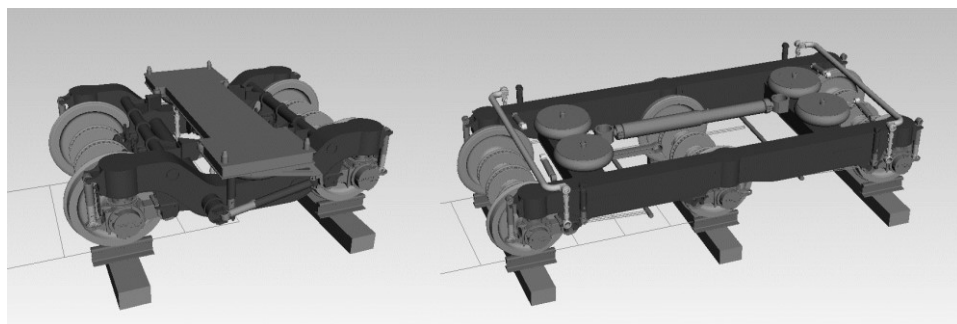
Tab. 2 Vybrané parametry dvounápravového podvozku

Rozvor podvozku	[mm]	2 500
Hmotnost	[kg]	8046
Příčná báze vypružení (prim./sek.)	[mm]	2 000 / 2 000
Svislá tuhost pružiny prim. vypružení	[N/mm]	700+progrese
Horizontální tuhost kloubu vedení dvojkolí (x/y)	[N/mm]	8 000 / 4 000
Svislá tuhost pruž. sek. vypr. (nom./max.)	[N/mm]	320 / 460
Horizontální tuhost pruž. sek. vypr. (nom./max.)	[N/mm]	120 / 200
Tuhost stabilizátoru (celková okolo x)	[Nm/rad]	4e+6
Příčná vůle sek. vypružení (volná/max. v přímé)	[mm]	+/- 35 / 55

Společný podvozek je navržen s důrazem na maximální jednoduchost. Vedení dvojkolí je provedeno kyvnými rameny. Pryžové klouby kyvného ramene jsou odlišné pro krajní a střední dvojkolí. Zatímco krajní bloky mají dominující axiální tuhost, bloky vedení středního dvojkolí mají výrazně dominující radiální tuhost. Dále jsou kyvná ramena krajních dvojkolí propojena křížovou vazbou. Ta je modelována jako mechanická s převodem pohybu pomocí příčné orientovaných zkrutných tyčí, jejichž pohyby jsou tlumeny hydr. tlumičem. Primární vypružení je doplněno tlumičem svislých pohybů. Sekundární vypružení je vzduchové se sériově, koaxiálně umístěnými nouzovými pružinami. Pro každou vozovou skříň slouží jeden pár vzduchových pružin, který je podélně umístěn 1,6 m od středu podvozku. Vzduchové vypružení je záměrně navrženo na malé příčné bázi, která umožňuje malé horizontální pohyby a zároveň způsobuje malou změnu kolových sil při postavení vozidla na zborcené koleji při provozu na nouzovém vypružení. Příčné pohyby v sekundárním vypružení jsou pomocí speciální soustavy pružných a pevných dorazu omezeny tak, aby při postavení vozidla v oblouku bylo dosaženo požadované kinematiky. Toto řešení nemůže být v současné fázi výzkumu blíže prezentováno. Každé sekundární vypružení je doplněno torzním stabilizátorem a tlumiči svislých a příčných pohybů, nikoliv vrtivých. Přenos podélných sil mezi podvozkem a skříní je řešen pomocí podélně orientované ojnice, která podvozek váže k jedné ze skříní. Tato ojnice se nachází ve výšce pólu kývání podvozku. Přenos podélných sil mezi vozovými skříněmi se odehrává mimo podvozek, pomocí pevného, 2,4 m dlouhého spřáhla, které zároveň funguje jako deformační element pohlcující energii v případě nárazu. Vzájemné pohyby obou skříní jsou mimo to svázány pouze příčnými tlumiči, které jsou umístěny pod a nad přechodem mezi články.

Tab. 3 Vybrané parametry třínápravového podvozku

Rozvor podvozku	[mm]	2 x 2 400
Hmotnost neodpružených hmot	[kg]	3 x 1 820
Hmotnost 1x odpružených hmot	[kg]	5 000
Hmotnost 2x odpružených hmot	[kg]	506
Příčná báze vypružení (prim./sek.)	[mm]	2 000 / 800
Svislá tuhost pružiny prim. vypružení	[N/mm]	700+progrese
Horizontální tuhost kloubu vedení kr. dvojkolí (x/y)	[N/mm]	3 000 / 8 000
Horizontální tuhost kloubu vedení kr. dvojkolí (x/y)	[N/mm]	20 000 / 600
Svislá tuhost pruž. sek. vypr. (nom./max.)	[N/mm]	260 / 410
Horizontální tuhost pruž. sek. vypr. (nom./max.)	[N/mm]	100 / 160
Tuhost stabilizátoru (celková okolo x)	[Nm/rad]	6e+6
Příčná vůle sek. vypružení (volná/max. v přímé)	[mm]	+/- 35 / 55
Mezivozový příčný tlumič (2x)	[Ns/m]	30 000



Obr. 2 MBS modely obou typů podvozků

2.3 Dynamický model

Dynamický model vozidla je sestaven ze substruktur jednotlivých podvozků a substruktur jednotlivých vozových skříní. Ty jsou v tomto případě identické a vyznačují se hmotnostními parametry shrnutými v tab. 4

Tab. 4 Hmotnostní parametry vozových skříní

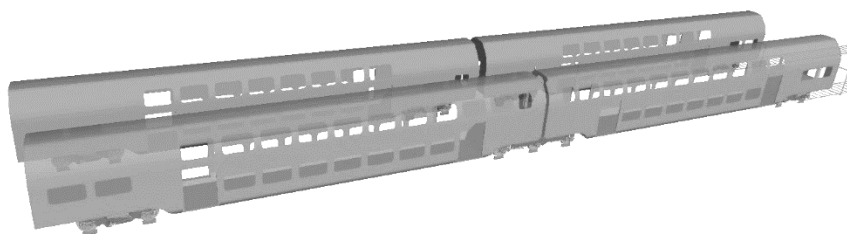
Stav obsazení (dle [4])		MVD	MND	MXD
Hmotnost	[kg]	28 160	35 450	47 718
Podélná poloha těžiště od středu 2n	[mm]	9 400	9 380	9 360
Moment setrvačnosti I _{xx}	[kg.m ²]	69 000	76 000	89 000
Moment setrvačnosti I _{yy}	[kg.m ²]	1 589 000	1 969 000	2 609 000
Moment setrvačnosti I _{zz}	[kg.m ²]	1 556 000	1 937 000	2 577 000

2.4 Referenční vozidlo

Pro možnost porovnání vlastností zkoumaného vozidla byla sestavena referenční souprava sestávající ze dvou čtyřnápravových dvoupodlažních vozů využívajících stejné dvounápravové podvozky. Vozy jsou spojeny pevným spřáhlem o délce 2,5 m. Další základní parametry jsou shrnuty v tab. 5.

Tab. 5 Základní parametry čtyřnápravového referenčního vozu

Délka	[m]	26,4
Šířka	[m]	2.80
Vzdálenost otočných čepů	[m]	19,5
Hmotnost	[t]	45,6
Max. nápravové zatížení	[kN]	158



Obr. 3 MBS modely zkoumaného vozidla a referenční soupravy v prostředí Simpack

3 VÝZKUM DYNAMICKÝCH VLASTNOSTÍ

V rámci dalšího zkoumání proveditelnosti pojezdu *D-DART* byly provedeny vyšetření následujících oblastí:

- posouzení stability jízdy vyššími rychlostmi,
- dynamické namáhání mostů dle RiL 810.02,
- komfort v přechodnicích dle EN 12 299,
- silové účinky v kontaktu kolo–kolejnice ve vztahu k opotřebení.

3.1 Posouzení stability jízdy vyššími rychlostmi

Za účelem prověření stability chodu pojezdu *D-DART* byla vyhodnocena kritická rychlost, a to pomocí všech 3 prakticky používaných výpočetních metod. Jedná se o:

- A) Vyhodnocení ΣY_{rms} při simulaci jízdy po nerovné koleji (ERRI LOW) bez příčného zrychlení – sada simulací s různými rychlostmi (krok 5 m/s) – vyhodnocení dle EN 14363.
- B) Vyhodnocení útlumu příčné oscilace dvojkolí po vybuzení přejetím příčné nerovnosti (3 mm) při jízdě s malým odrychlením ($a = -0,6$ km/h/s) – vyhodnocení příčných výchylek všech dvojkolí ($y \leq 0,2$ mm).
- C) Vyhodnocení útlumu příčné oscilace dvojkolí po vybuzení přejetím příčné nerovnosti (3 mm) při jízdě konstantní rychlostí – sada simulací s různými rychlostmi (krok 5 m/s) – vyhodnocení příčných výchylek všech dvojkolí ($y \leq 0,2$ mm).

Při simulacích byl použit souč. adheze $\mu = 0,4$, algoritmus FASTSIM s koeficientem $k_A = 1$ bez dalších korekcí a profily (a úklony) kolejnic, které v kombinaci s profilem kola S1002 vytvářejí ekvivalentní konicitu (při výchylce 3 mm) 0,08, 0,2, 0,4 a 0,8. Výsledky tohoto vyšetření jsou shrnuty v tab. 6. Vozidla byla v prázdném stavu.

Tab. 6 Vyhodnocení kritické rychlosti

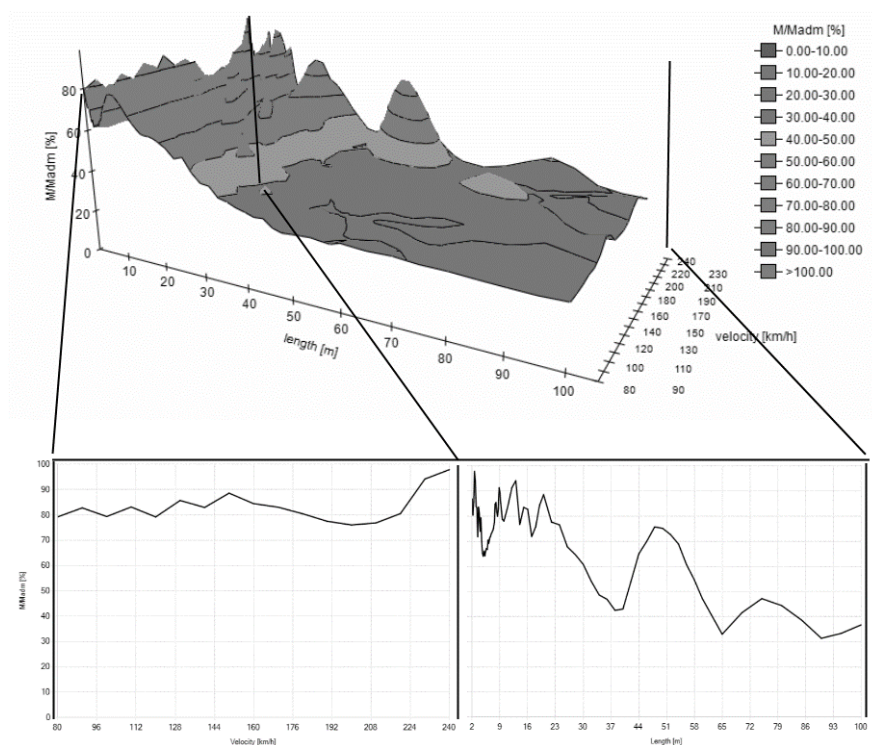
Vozidlo	2-článekový D-DART			2x 4-nápravový vůz		
Metoda	A)	B)	C)	A)	B)	C)
Ekv. konicita	Kritická rychlost [km/h]			Kritická rychlost [km/h]		
0,08	>250	>250	>250	>250	>250	>250
0,2	>250	>250	>250	>250	>250	>250
0,4	234	>250	>250	234	>250	>250
0,8	234	230	234	234	240	234

Z časových důvodů nebylo možné simulovat výrazně vyšší rychlostní rozsahy, které by také mohly být zajímavé, nicméně z výsledků je zřejmé, že v základním stavu zkoumané vozidlo vykazuje obdobné kritické rychlosti jako referenční souprava.

3.2 Dynamické namáhání mostů dle RiL 810.02

Pomocí programu ZBBD [1] byla vyhodnocena dynamická kompatibilita s mostními konstrukcemi. Ve fázi Stupe 1 je posuzován tzv. Signature, tedy jakási transformace rozestupu dvojkolí (určité rychlosti) do frekvenčního spektra. V tomto kroku lze často jednoduše posoudit vozidla s konvenčním pojezdem tím, že jejich Signature nepřesahuje obálku referenčních vozidel/souprav. Signature pojezdu *D-DART* se, celkem podle očekávání (vzdálenost podvozků 24 metrů), do této obálky nevešel a muselo být přistoupeno k posouzení ve fázi Stupe 2. Ve Stupe 2 je pomocí numerické integrace vypočten maximální (dynamický) ohybový moment prostého nosníku definovaného rozsahu mechanických vlastností a posouzen s limitní hodnotou cílové traťové třídy. Ta je v tomto případě zvolena D4DB. Vozidlo má být posuzováno ve stavu ložení MND + 160 kg/m². Nápravové zatížení tohoto stavu ložení se bezpečně vejde pod hodnotu 17 tun na nápravu, která byla vzata do výpočtu. Vyhodnocení využití limitní hodnoty ohybového momentu je vyobrazeno na obr. 4.

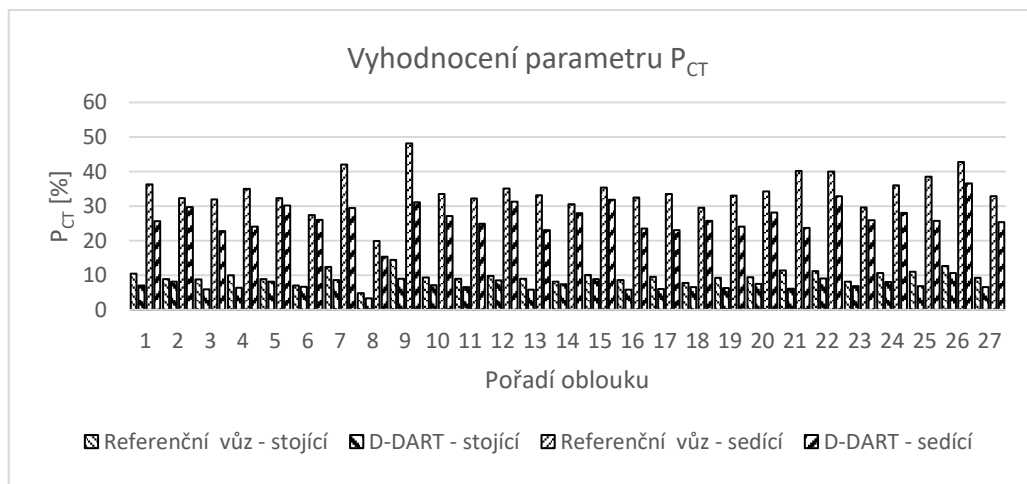
Z vyhodnocení Stupe 2 pomocí SW ZBBD vyplývá, že zkoumané vozidlo s rezervou vyhovuje z hlediska bezpečnosti dynamického namáhání mostních konstrukcí pro traťovou třídu D4DB.



Obr. 4 Vyhodnocení využití povoleného ohybového momentu v závislosti na délce mostu a rychlosti

3.3 Komfort v přechodnicích dle EN 12 299

Pro vyhodnocení vlivu konstrukce pojezdu *D-DART* na příčnou dynamiku zkoumaného vozidla byl vyhodnocen parametr P_{CT} . Tento parametr, popsáný v EN 12 299 [2] zohledňuje časový průběh příčného zrychlení, příčného ryvu a natáčení skříně kolem podélné osy (kolébání) a vytváří tak možnost porovnání chování různých vozidel v přechodnicích. Simulována byla jízda zkoumaných vozidel na severní rampě Gotthardského průsmyku v úseku Erstfeld – Göschenen, kde bylo vyhodnoceno celkem 27 vjezdů do oblouku. Pro tento účel byla vzata prázdná vozidla, u kterých jsou obecně zrychlení ve skříní větší.



Obr. 5 Vyhodnocení parametru P_{CT} pro zkoumaný vůz a referenční soupravu

Vyhodnocení parametru P_{CT} ukázalo, že chování skříňové vedené společným podvozkem se při nájezdu do oblouku chová lépe než skříňová vedená klasickým dvounápravovým podvozkem. To lze vysvětlit menšími špičkami příčného zrychlení. To je způsobeno větším zapojením příčné tuhosti vzduchového vypružení na společném podvozku (větší příčná deformace), které zmenšuje vliv progresivního příčného dorazu a tím rázy plynoucí z jeho zapojení. To je velice výhodný efekt tohoto pojezdu, který je ovšem vyvážen horším chováním při průjezdu obloukem s přebytkem převýšení.

3.4 Silové účinky v kontaktu kolo–kolejnice

Se zkoumaným vozidlem byly provedeny simulace jízdní bezpečnosti dle EN 14363:2016 v celém rozsahu. Ty byly provedeny pro maximální rychlost $v_{adm} = 200$ km/h a maximální nedostatek převýšení $i_{adm} = 150$ mm, použitý souč. tření $\mu = 0,4$. Vozidlo nepřekračuje žádnou limitní hodnotu.

Společný, třínápravový podvozek *D-DART* jako součást zkoumaného vozu se vyznačuje vyvozováním příčných sil na nabíhající dvojkoř na podobné úrovni jako nabíhající dvojkoř vedoucího podvozku referenčního vozu. V obou případech je vozidlo s rezervou zařaditelné do skupiny **příčné přechodnosti 1**

Ztrátový výkon v kontaktu kolo–kolejnice všech dvojkoř třínápravového podvozku celkem se v popsaném provedení pohybuje na úrovni cca 150 % dvounápravového podvozku, přičemž je třeba mít na paměti, že „nahrazuje“ 2 standardní dvounápravové podvozky.

Mechanismus radiálního stavění nebyl dosud optimalizován a lze očekávat, že poskytuje velký prostor pro zmenšení silových účinků mezi podvozkem a koleji.

4 ZÁVĚR

Dynamické chování dvoučlankového, dvoupodlažního vozu se společným třínápravovým podvozkem bylo prověřeno stran stability jízdy vyššími rychlostmi, dynamické kompatibility s mosty, příčného komfortu v nájezdu do oblouku a silových účinků na trať. Při žádné z těchto dílčích analýz nebyla objevena žádná překážka, která by bránila technické proveditelnosti tohoto konceptu. Konceptu podvozku *D-DART* lze tedy minimálně pro aplikaci pro dvoučlankové vozidlo dále považovat za proveditelný.



Literatura

- [1] *Brückenkompatibilität* [online]. © 2019 Deutsche Bahn AG. [cit. 12. 07. 2021]. Dostupné z: https://fahrweg.dbnetze.com/fahrweg-de/kunden/nutzungsbedingungen/technischer_netzzugang/brueckenkompatibilitaetsberechnung-1369102
- [2] DIN EN 15528. *Railway applications – Line categories for managing the interface between load limits of vehicles and infrastructure*. Berlin: DIN, 2016.
- [3] DIN EN 14363. *Railway applications – Testing and simulations for the acceptance of running characteristics of railway vehicles*. Berlin: DIN, 2019.
- [4] DIN EN 15663. *Railway application – Vehicle reference masses*. Berlin: DIN, 2019.
- [5] DIN EN 12299. *Railway application – Ride comfort for passengers – Measurement and evaluation*. Berlin: DIN, 2009.