

## VALIDACE MBS MODELU TRAMVAJE

### VALIDATION OF AN MBS MODEL OF A TRAM

Jan PEJŠA<sup>1</sup>

e-ISBN: 978-80-7560-564-1  
DOI: 10.46585/spkv20252699

ISSN: 3029-8342



#### Abstrakt

Příspěvek se zabývá validací MBS (více tělesový systém) modelu tříčlánkové tramvaje. Před validací byly parametry silových prvků modelu aktualizovány na základě experimentálních dat získaných od výrobců jednotlivých komponent vypružení. Validace modelu byla provedena na základě výsledků měření během stacionárních zkoušek vozidla. Stacionární zkoušky zahrnovaly vážení vyrobených tramvají, zkoušku stlačování podvozků, zkoušku vlastností pohybů v příčném směru a zkrucovací zkoušku. Pro dosažení co nejlepší shody mezi experimentálními daty a výsledky simulací byly optimalizovány hodnoty klíčových parametrů modelu pomocí citlivostní analýzy. Úspěšně provedenou validací bylo dosaženo potřebné věrohodnosti modelu pro jeho využití při simulačním posouzení stacionárních jízdně-technických vlastností v rámci schvalovacího procesu vozidla do provozu.

#### Klíčová slova

tramvaj, validace, Multi-Body Simulation (MBS), model, stacionární zkoušky, pryžové pružiny, vážení vozidla, zkouška stlačování podvozku, zkouška vlastností pohybů v příčném směru, zkrucovací zkouška, schvalovací proces

#### Abstract

*The paper deals with the validation of an MBS (Multi-Body System) model of a three-section tram. Before the validation, the parameters of the model's force elements were updated based on experimental data obtained from the manufacturers of the suspension components. The model validation was carried out based on measurement results obtained during stationary tests of the vehicle. The stationary tests included weighing of the manufactured trams, a bogie compression test, a determination of displacement characteristics test, and a twist test. To achieve the best agreement between the experimental data and the simulation results, key model parameter values were optimized using sensitivity analysis. Successful validation ensured the required credibility of the model for its use in simulation-based assessment of stationary ride characteristics as part of the vehicle homologation process.*

#### Keywords

*tram, validation, Multi-Body Simulation (MBS), model, stationary tests, rubber spring, vehicle weighing, bogie compression test, determination of displacement characteristics test, twist test, homologation process*

## 1 ÚVOD

V současném vývoji kolejových vozidel představují simulační nástroje založené na principu více tělesové soustavy (MBS, Multi-Body System) nepostradatelný prostředek pro predikci dynamického

---

<sup>1</sup> Ing. Jan Pejša,  0009-0003-7127-9184. VÚKV a.s. Bucharova 1314/8, 158 00 Praha – Stodůlky, Česká republika, tel.: +420 736 519 962, e-mail: pejsa@vukv.cz

chování vozidel v různých provozních podmínkách. Pro jejich nasazení v inženýrské praxi a zejména v rámci schvalovacích procesů je však nezbytné zajistit vysokou míru shody simulačního modelu s chováním skutečného vozidla – tedy provést validaci modelu na základě experimentálně získaných dat. Validace není pouze formálním krokem, ale zásadní podmínkou pro získání důvěryhodných výsledků simulací, na jejichž základě lze činit kvalifikovaná rozhodnutí týkající se konstrukce, jízdních vlastností a v neposlední řadě jízdní bezpečnosti vozidla.

V případě tramvajových vozidel nabývá význam validace MBS modelu na ještě větší důležitosti. Na rozdíl od konvenčních železničních vozidel zde často existují výrazná konstrukční a provozní omezení a odlišnosti, která limitují rozsah a možnosti jízdních zkoušek. Mezi ně patří například komplikovaná integrace měřicích dvojkolí do tramvajových podvozků, zejména kvůli konstrukčním odlišnostem (různé profily kol, různé průměry kol, různé rozchody kolejí, brzdové kotouče v kolech atd.). Výroba speciálních měřných dvojkolí, které jsou kompatibilní s danou tramvajovou koncepcí, je technologicky i finančně náročná.

Z výše uvedených důvodů je validovaný MBS model tramvaje důležitým nástrojem nejen pro účely konstrukčních optimalizací a predikce jízdně-technických vlastností, ale také jako součást schvalovacího procesu, kde může v řadě případů nahradit či doplnit obtížně realizovatelné jízdní zkoušky.

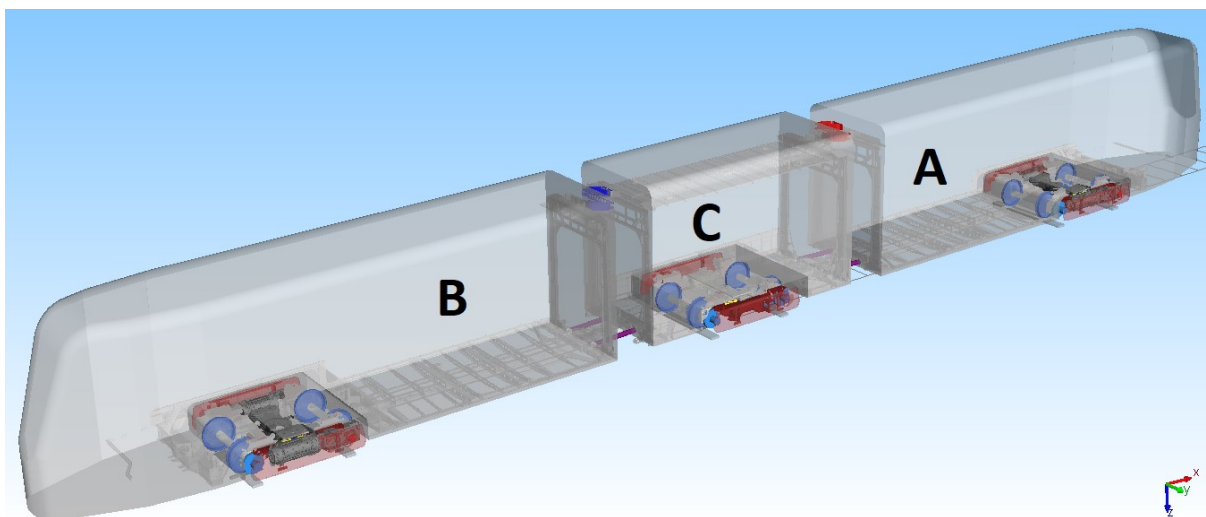
Cílem tohoto příspěvku je představit postup a výsledky validace MBS modelu tříčlánekové tramvaje na základě výsledků měření během stacionárních zkoušek.

## 2 POPIS MBS MODELU TRAMVAJE

Model tramvaje (obr. 1) je tvořen absolutně tuhými tělesy, která jsou vzájemně propojena pomocí silových prvků (modelujících pružiny, tlumiče, nárazky atd.) a kinematických vazeb (modelujících ložiska, klouby atd.) tak, aby model respektoval skutečnou konstrukci vozidla z pohledu dynamického chování. Model je složen z 86 těles a má 302 stupňů volnosti. K tvorbě modelu byl použit software Simpack 2024.1.

Tramvaj je tvořena třemi články A, B a C. Pod krajními články A a B se nachází otočné hnací podvozky. Pod prostředním článkem C se nachází částečně otočný běžný podvozek. Články jsou spojeny pomocí mezičlánekových spojení AC a BC, která jsou realizována horním a dolním spojením.

Vazba dvojkolí a kolejnice byla modelována tak, aby respektovala ustavení vozidla během stacionárních zkoušek.



**Obr. 1** Grafická reprezentace modelu tramvaje v prostředí Simpack

### 2.1 Popis podvozků

Modely podvozků v sobě zahrnují tělesa, která reprezentují rám, pohonné jednotky, dvojkolí, kolébku, kyvná ramena atd. Tělesa v modelu jsou vzájemně propojena pomocí silových prvků, které reprezentují primární vypružení, sekundární vypružení, nárazky atd.

## Primární vypružení

Vedení dvojkolí je v podvozcích realizováno kyvnými rameny. Kyvná ramena jsou uchycena k rámu podvozku pomocí pryžových silentbloků a bloků pryžových pružin, které se nachází na kyvném rameni. Rozsahy pohybů primárního vypružení jsou omezeny pevnými nárazkami a podchytkou.

## Sekundární vypružení

V obou typech podvozků se na příčniku nachází příčný tlumič a torzní stabilizátor. Na podélnících se na každé straně podvozku nachází sloupce vinutých pružin a svislý sekundární tlumič. Sloupce pružin hnacího podvozku jsou na horním konci uchyceny ke kolébce. U běžného podvozku jsou sloupce pružin uchyceny přímo k vozové skříni. Uvnitř každého sloupce pružin je uložena přídatná pryžová pružina, která tvoří druhý stupeň charakteristiky vypružení. V příčném směru je druhý stupeň charakteristiky vypružení tvořen pryžovými nárazkami, umístěnými uvnitř rámu. Rozsahy pohybů sekundárního vypružení jsou omezeny pevnými nárazkami a podchytkou. Přenos podélných sil je v podvozcích realizován pomocí podélných táhel.

## Spojení podvozku s vozovou skříní

Sekundární vypružení podvozků A a B je uchyceno ke kolébce, která je pomocí otočového ložiska spojena s vozovou skříní. Maximální rozsah natočení podvozků A a B je omezen pevnými dorazy.

Sekundární vypružení podvozku C je uchyceno přímo k vozové skříni. Rozsah natáčení podvozku C pod vozovou skříní je výrazně menší a je omezen pevnými dorazy.

## 3 VALIDAČNÍ KONCEPT STACIONÁRNÍCH ZKOUŠEK

V oblasti zkoušení a simulování pro schvalování tramvajových vozidel z hlediska jízdních vlastností v současnosti neexistuje jednotná, ucelená technická norma. Z tohoto důvodu byly pro tyto účely přebrány fyzikálně platné principy i pro tramvajová vozidla z evropské normy [1], která definuje požadavky na zkoušení a simulace pro schvalování železničních vozidel z hlediska jízdních vlastností.

Norma [1] ve své příloze T specifikuje požadavky na validační proces simulačních modelů, které mohou být použity jako alternativa ke klasickým jízdním zkouškám při schvalování vozidla do provozu. Tato příloha rozlišuje dva základní přístupy k validaci, označované jako metoda 1 a metoda 2:

- Metoda 1 umožňuje validaci modelu pro omezený rozsah použití, závislý na velikosti oblasti provedené validace.
- Metoda 2 je určena pro plnohodnotnou validaci modelu, která umožňuje nahrazení kompletní jízdní zkoušky simulací provedenou validovaným modelem.

V případě validace MBS modelu tramvaje byl z velké části aplikován méně přísný validační přístup dle metody 1. Tento přístup byl zvolen s ohledem na specifika tramvajového provozu a skutečnost, že maximální rychlost tramvajových vozidel se pohybuje okolo 60 km/h, což je maximální rychlost, pro kterou norma [1] připouští upuštění od procesu schvalování vozidel z pohledu jízdních vlastností. V rámci procesu validace byly uplatněny limitní odchylky mezi simulačními výsledky a reálnými měřeními tak, jak jsou popsány právě v metodě 1 přílohy T normy [1].

Validační proces byl zdokumentován ve validační zprávě, která slouží jako podklad pro posouzení ze strany schvalovací autority. Posouzení správnosti validace schvalovací autoritou je nutným krokem v rámci schvalovacího procesu. Zpráva obsahuje popis použité metodiky, vstupní parametry modelu, použitá měření, způsob porovnání i výsledné hodnocení shody mezi simulacemi a měřeními.

## 4 AKTUALIZACE PARAMETRŮ SILOVÝCH PRVKŮ

Původní MBS model tramvaje (dále „Návrhový model“) byl sestaven ve fázi vývoje vozidla a byl založen na návrhových charakteristikách silových prvků. Tyto charakteristiky zpravidla vycházely z předběžných údajů od výrobců jednotlivých komponent, návrhových výpočtů, případně kvalifikovaných

odhadů. Aby model, co nejlépe odpovídal skutečnosti, bylo nutné tyto návrhové charakteristiky aktualizovat na základě naměřených dat jednotlivých silových prvků.

Po dokončení výroby prvních kusů komponent vypružení bylo provedeno měření jejich charakteristik. Měřeny byly všechny prvky primárního a sekundárního vypružení a mezičláňkových spojení. U pružin byla měřena závislost síla-deformace, u tlumičů závislost síla-rychlost.

#### 4.1 Pryžové prvky

Zvláštní pozornost byla věnována aktualizaci parametrů pryžových prvků, zejména pryžovým komponentám v primárním vypružení. Podklady pro aktualizaci parametrů vycházely z podrobných výsledků měření jejich charakteristik a dalších důležitých vlastností.

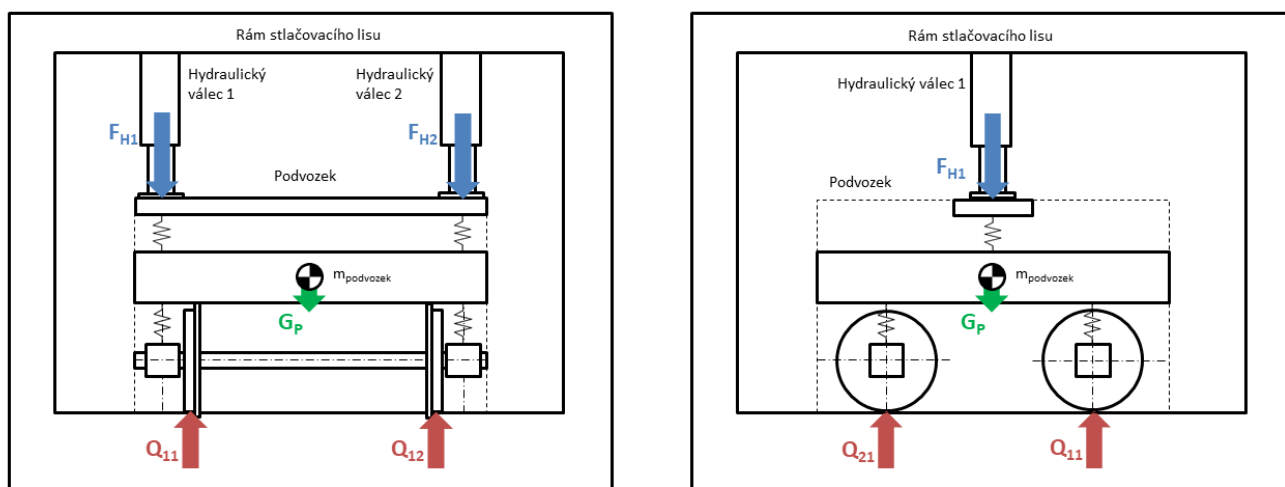
Pryž je viskoelastický materiál, což znamená, že v sobě kombinuje pružnost a vnitřní útlum. Zjednodušeně lze říci, že pryžová pružina se chová částečně jako pružina a částečně jako tlumič. Nicméně problematika chování pryže je, nejen kvůli jejímu nelineárnímu chování ale také kvůli změně dynamických vlastností v závislosti na způsobu zatěžování a dalších vlivů, značně složitější. Měření charakteristik proto bylo navrženo tak, aby tyto vlivy v dostatečné míře postihlo a výsledky měření byly aplikovatelné pro simulace jízdních vlastností vozidla za nejméně příznivých podmínek.

Specifickým rysem pryžových prvků je změna vlastností vlivem teploty. Provozní rozsah teplot tramvaje je od  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . V tomto rozsahu teplot již může u pryžových prvků docházet k významným změnám tuhosti. Při nízkých teplotách dochází u pryžových prvků ke zvyšování jejich tuhosti, což není bez vlivu na interakci vozidlo-kolej. Z toho důvodu bylo provedeno měření charakteristik klíčových pryžových prvků také za nízkých teplot.

Ke změně vlastností pryžových prvků dochází také vlivem stárnutí. Zpravidla s narůstajícím počtem cyklů dochází k jejich tuhnutí. Proto došlo u klíčových prvků vypružení k opakovanému měření jejich charakteristik v průběhu a na konci životnostní zkoušky.

### 5 STLAČOVÁNÍ PODVOZKŮ

Stlačovány byly oba typy podvozku, běžný a hnací. Cílem měření bylo ověřit statické svislé charakteristiky plně vystrojených podvozků. Statická svislá charakteristika podvozku je určena hlavně prvky svislého vypružení, ale parazitně ji ovlivňují také jiné prvky vypružení a ostatní vazby mezi vypruženými částmi, například silentbloky.



Obr. 2 Schéma stlačovacího lisu (vlevo – přední pohled, vpravo – pohled zleva)

Stlačování podvozků probíhalo na speciálním stlačovacím lisu, který pomocí hydraulických válců stlačoval podvozek (obr. 2). Hydraulické válce tlačily na podvozek v místech sekundárních pružin a simulovaly tak zatížení vyplývající z tíhy neseného članku. Stlačovací lis umožňuje měřit zatěžovací síly

a svislé kolové síly pod každým kolem. Zároveň byla během stlačování měřena svislá deformace primárního a sekundárního vypružení. Stlačování probíhalo od nulového zatížení do zatížení odpovídající provozně loženému vozidlu.

Na základě naměřených dat bylo možné ověřit hmotnosti podvozků a ekvivalentní tuhosti primárního a sekundárního vypružení ve svislém směru.

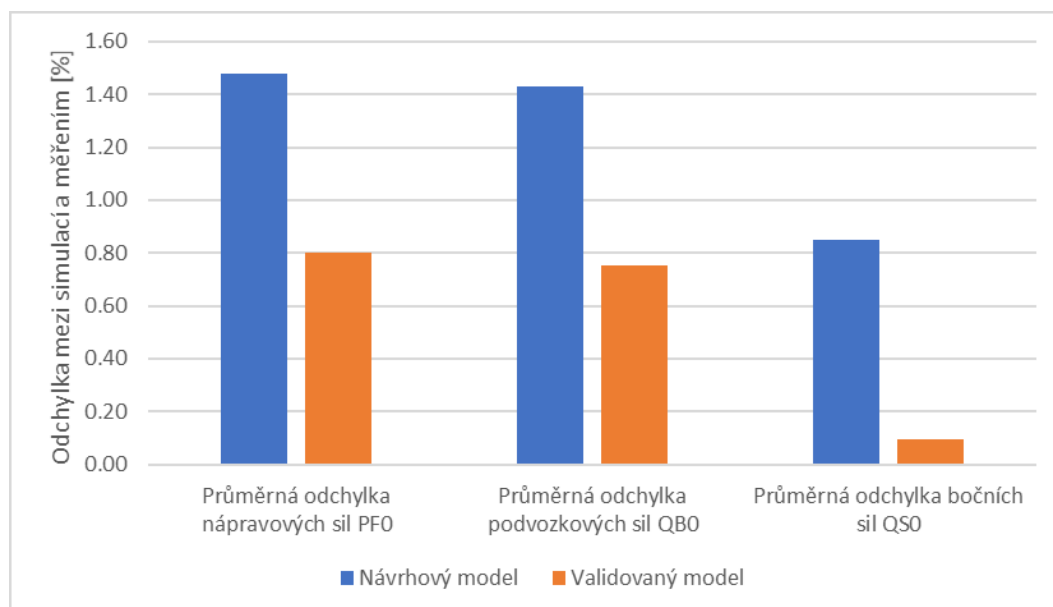
## 6 VÁŽENÍ VOZIDLA

Vážení vozidla sloužilo ke kontrole rozložení statických svislých kolových sil. Rozložení a velikost statických svislých kolových sil jsou ovlivněny hmotností vozidla, polohou těžiště, primárním a sekundárním vypružením. Výsledky vážení vozidla jsou pro validaci MBS modelu vozidla podstatným vstupem a podle validační metody 1 uvedené v příloze T v normě [1], je nutné pro věrohodně validovaný model splnit limitní odchylky mezi výsledkem simulace a měřením (tab.1).

Tab. 1 Požadované limitní odchylky pro úspěšnou validaci dle [1]

| Parametr                          | Maximální odchylka | Průměrná odchylka všech dvojkolí, podvozků atd. |
|-----------------------------------|--------------------|-------------------------------------------------|
| Statická nápravová síla $P_{F0}$  | 6 %                | 3 %                                             |
| Statická podvozková síla $Q_{B0}$ | 3 %                | 3 %                                             |
| Statická boční síla $Q_{S0}$      | 3 %                | 3 %                                             |

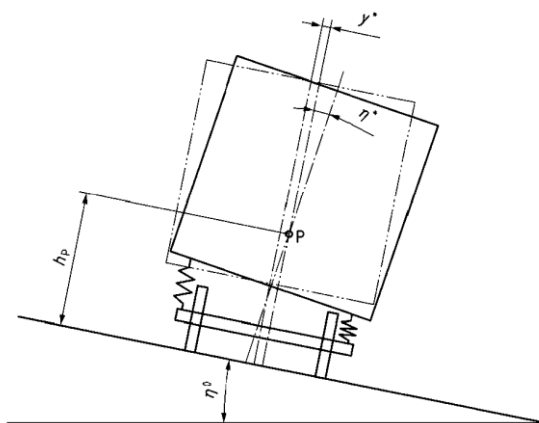
Na obr. 3 jsou zobrazené průměrné odchylky mezi měřením a simulací s návrhovým modelem a s validovaným modelem, který obsahoval aktualizované hmotnostní parametry. Velký rozdíl v odchylkách návrhového modelu a validovaného modelu byl především dán tím, že hmotnostní parametry vyrobených vozidel byly oproti hmotnostním parametrům vozidla v návrhovém hmotnostním rozboru odlišné. I přesto návrhový model plnil požadované limitní odchylky dle tab.1. Nicméně základním cílem validace je dosáhnout, co nejnižších odchylek.



Obr. 3 Průměrné odchylky mezi měřením a simulací s návrhovým a validovaným modelem

## 7 ZKOUŠKA VLASTNOSTÍ POHYBŮ V PŘÍČNÉM SMĚRU

Měření vlastností pohybů v příčném směru tramvaje bylo provedeno dle přílohy D normy [1] metodou 1, která je stacionární a dochází během ní k naklánění vozidla od nulového úhlu převýšení do maximálního úhlu převýšení  $\eta^0$  na levou a pravou stranu (obr. 4).

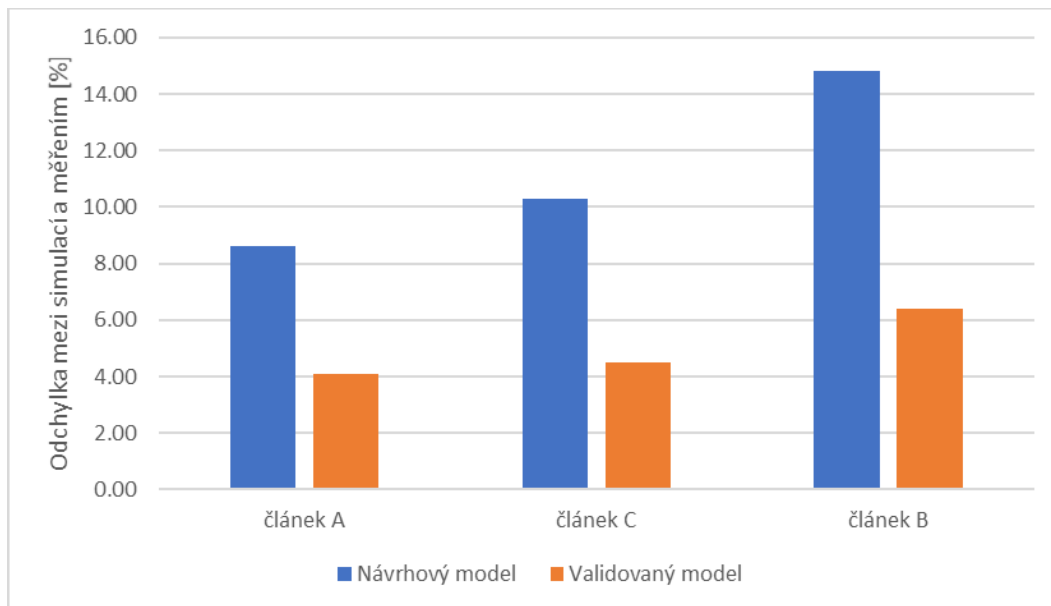


**Obr. 4** Stojící vozidlo na převýšené koleji (příklad vozidla bez podvozků); zdroj: [1]

V průběhu zkoušky byly zaznamenávány hodnoty veličin: převýšení koleje (úhel převýšení), náklony dvojkolí, náklony podvozků, náklony článků, stlačení primárního vypružení, stlačení sekundární vypružení a svislé kolové síly. Velikost náklonu článků je ovlivněna zejména hmotnostními parametry článku, tuhostí torzního stabilizátoru a charakteristikou primárního a sekundárního vypružení ve svislém a příčném směru.

Pro dosažení co nejlepší shody výsledků simulací s měřením byla provedena citlivostní analýza měřených veličin na klíčových parametrech vozidla ovlivňujících velikost náklonu.

Díky výsledkům citlivostní analýzy bylo možné klíčové parametry modelu efektivně optimalizovat a dosáhnout výrazného snížení odchylky mezi simulací a měřením. Dle validační metody 1 není požadováno dosáhnout konkrétní limitní odchylky mezi simulací a měřením ale je doporučeno dosažené odchylky informativně uvést. Odchylky součinitele poddajnosti mezi měřením a simulací s návrhovým modelem tramvaje a s validovaným modelem jsou zobrazeny na obr. 5.



**Obr. 5** Odchylky součinitele poddajnosti mezi měřením a simulací s návrhovým a validovaným modelem

## 8 ZKRUCOVACÍ ZKOUŠKA

Zkrucovací zkouška byla provedena ve dvou režimech:

- Režim 1: Průběh zkrucování byl odvozen z [1]. V tomto režimu docházelo ke zkroucení vozidla na bázi rozvoru podvozku a na bázi vzdálenosti podvozků.
- Režim 2: V tomto režimu byly zkrucovány pouze podvozky. Tento režim je specifický pro tramvajový provoz a odpovídá například podmínkám při jízdě jednoho kola podvozku po okolku.

V průběhu zkoušky byly stejně jako v případě naklánění vozidla měřeny veličiny: náklony koleje, náklony dvojkolí, náklony podvozků, náklony skříní, stlačení primárního, sekundární vypružení a svislé kolové síly.

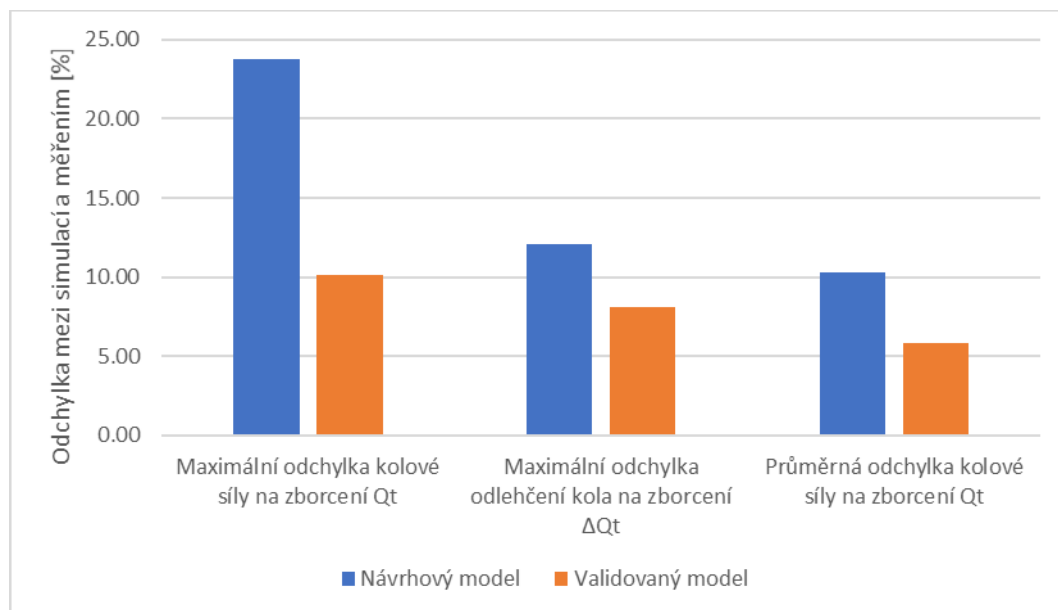
Zkrucovací zkouška je zcela zásadní součástí procesu posouzení bezpečnosti proti vykolejení vozidla. Z toho důvodu by se výsledky simulace zkrucovací zkoušky s věrohodným MBS modelem vozidla měly blížit naměřeným hodnotám. Validací metoda 1 dle přílohy T v normě [1] doporučuje, jakých odchylek mezi měřením a simulací s validovaným modelem by mělo být dosaženo (tab. 2). Tyto doporučené odchylky byly pro validaci MBS modelu tramvaje převzaty.

**Tab. 2** Doporučené odchylky pro úspěšnou validaci dle [1]

| Parametr                                | Maximální odchylka | Průměrná odchylka všech dvojkolí, podvozků atd. |
|-----------------------------------------|--------------------|-------------------------------------------------|
| Kolová síla na zborcení $Q_t$           | 15 %               | 7 %                                             |
| Odlehčení kola na zborcení $\Delta Q_t$ | 10 %               | Není specifikováno                              |

Velikost kolových sil a odlehčení kol během zkrucování jsou zejména ovlivňovány hmotnostními parametry článku, svislou tuhostí primárního a sekundárního vypružení, tuhostí torzního stabilizátoru a tuhostí mezičládkových vazeb. Pro objasnění vlivu zmíněných parametrů modelu vozidla na měřené veličiny během zkrucování bylo využito citlivostní analýzy.

Díky tomu bylo možné zmíněné klíčové parametry modelu efektivně optimalizovat a dosáhnout doporučených odchylek uvedených v tab. 2. Odchylky mezi měřením a simulací s návrhovým modelem tramvaje a s validovaným modelem jsou zobrazeny na obr. 6.



**Obr. 6** Odchylky mezi měřením a simulací s návrhovým a validovaným modelem

## 9 ZÁVĚR

Příspěvek popisuje postup a výsledky validace MBS modelu tříčládkové tramvaje s cílem zajistit dostatečnou věrohodnost modelu pro simulační posouzení stacionárních jízdně-technických vlastností v rámci schvalovacího procesu vozidla. Validace byla provedena na základě kombinace experimentálních měření prvků vypružení a stacionárních zkoušek vozidla, které zahrnovaly vážení vozidla, zkoušku stlačování podvozků, zkoušku vlastností pohybů v příčném směru a zkrucovací zkoušku. Během validace byly aktualizovány charakteristiky silových prvků na základě naměřených dat, přičemž zvláštní důraz byl kladen na nelineární a viskoelastické chování pryžových komponent včetně zohlednění vlivu teploty

a stárnutí. K dosažení požadované shody mezi výsledky simulací a experimentálních měření byla provedena citlivostní analýza a optimalizace klíčových parametrů modelu.

Validovaný model vykazuje dobrou shodu se skutečným chováním vozidla v rozsahu provedených zkoušek, přičemž byly dle přílohy T normy [1] splněny požadavky na maximální a průměrné odchylky mezi simulací a měřením.

V budoucnu bude pokračovat validace modelu v dynamické oblasti, aby bylo možné jeho plné využití v rámci schvalovacího procesu vozidla z hlediska jízdních vlastností. Pro rozšíření věrohodnosti modelu v dynamické oblasti bude použito experimentálně získaných dat z průjezdu tramvaje městem.

Poděkování společnosti Škoda Transportation a.s. za umožnění vydání tohoto příspěvku.



### Literatura

- [1] ČSN EN 14363+A2:2024. *Železniční aplikace – Zkoušení a simulace pro schvalování železničních vozidel z hlediska jízdních vlastností – Jízdní chování a stacionární zkoušky.*

*Zasláno / received: 30. 06. 2025, přijato / accepted: 02. 08. 2025, publikováno / published: 17. 09. 2025.*

*Příspěvek recenzovali / The paper was reviewed by: doc. Dr. Ing. Pavel Polach (Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o.), Ing. Jiří Šlapák, Ph.D. (Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera).*