

MOŽNOSTI TESTOVÁNÍ ČEL TRAMVAJÍ S OHLEDEM NA KOLIZI S CHODCEM

TRAMS FRONT ENDS TESTING WITH RESPECT TO THE COLLISION WITH A PEDESTRIAN

Roman JEŽDÍK¹, František LOPOT², Vojtěch RULC³

e-ISBN: 978-80-7560-564-1

DOI: 10.46585/spkv20252657

ISSN: 3029-8342



Abstrakt

Tato práce se zabývá některými důsledky připravovaného legislativního požadavku, který se týká konstrukce čel tramvají a vozidel lehké stavby s ohledem na kolizi s chodcem. Tato legislativa může vést k potřebě využití validovaného modelu figuríny, který prozatím není k dispozici. Je proto nastíněna možnost převzetí řešení z automobilového průmyslu.

Klíčová slova

figurína, čelo tramvaje, srážka, impaktor

Abstract

This paper deals with some of the implications of the upcoming legislative requirement concerning the design of the tram front ends and LSV with respect to pedestrian collisions. This legislation may lead to the need to use a validated dummy model, which is not yet available. Therefore, the possibility of adopting solutions from the automotive industry is indicated.

Keywords

dummy, tram front end, collision, impactor

1 ÚVOD

Chování městských kolejových vozidel s ohledem na následky možné kolize lze hodnotit jak z pohledu řidiče a cestujících, tak z pohledu okolí vozidla (tzn. zejména chodců).

Problematika ochrany řidiče a cestujících při kolizi je od roku 2008 řešena normou EN 15227, jejíž poslední vydání pochází z roku 2020, viz [1]. V současné době se připravuje její nová verze v rámci standardů organizace ISO.

Problematickou ochrany chodců z hlediska možné kolize s městským kolejovým vozidlem se zabývá technická zpráva TR 17420 [2]. Tato zpráva je v současnosti Technickou komisí CEN/TC 256 transformována do podoby návrhu nové evropské normy prEN 17420 [3]. Některými důsledky tohoto legislativního požadavku se zabývá tento příspěvek.

¹ Ing. Roman Ježdík,  0000-0002-6691-0600. VÚKV a.s. Bucharova 1314/8, 158 00 Praha 5 – Stodůlky, Česká republika, e-mail: jezdik@vukv.cz

² Ing. František Lopot, Ph.D.,  0000-0001-5731-6784. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav konstruování a částí strojů. Technická 1902/4, 166 07 Praha 6 – Dejvice, Česká republika, e-mail: frantisek.lopot@fs.cvut.cz

³ Ing. Vojtěch Rulc, Ph.D. Advanced Engineering s.r.o. Beranových 65, 199 21 Praha 9 – Letňany, Česká republika, e-mail: vrulc@advanced-eng.cz

2 LEGISLATIVNÍ POŽADAVKY

Jsou definovány dva kolizní scénáře:

- Scénář A – kolize stojícího chodce s čelní částí tramvaje
- Scénář B – kolize tramvaje s chodcem ležícím v jízdní dráze tramvaje

2.1 Scénář A

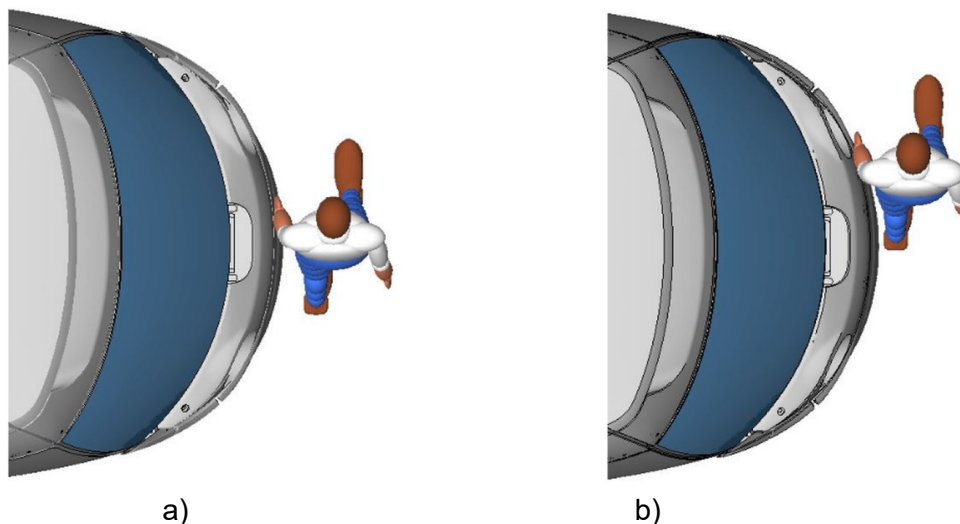
Požadavky na tento scénář mohou být naplněny dodržením předepsané geometrie čelní partie vozidla nebo mohou být prokázány pomocí numerických simulací s validovaným modelem zkušební figuríny (crash test dummy).

Geometrické požadavky

Geometrické požadavky jsou v technické zprávě TR 17420 [2] pro případ srážky s chodcem stanoveny s cílem zajistit boční vychýlení těla (eliminovat jeho následné přejetí) a snížit riziko smrtelného poranění hlavy. Požadovaná geometrie je definována půdorysným tvarem nejpřednější linie vozidla (vychýlení chodce mimo vozidlo) a definicí bokorysu čelní partie (sklon čela a členitost čelní plochy). V návrhu nové evropské normy prEN 17420 [3] je tato geometrie ještě upravena a upřesněna. Je to zohlednění zkušeností subjektů z komerční sféry se zaváděním požadavků předpisu [2].

Numerická simulace

Numerická simulace má být provedena pro případ nárazu tramvaje rychlostí 20 km/h do boku jdoucího chodce v definované poloze. Požaduje se modelování kolize, kdy je chodec umístěn v příčné vzdálenosti 15% a 50% pološířky tramvaje od osy koleje (viz obr. 1). Pro modelování má být použit validovaný model figuríny.



Obr. 1 Pozice chodce při numerické simulaci: a) 15% pološířky, b) 50% pološířky; převzato z [2]

Konstrukce přední části se považuje za vyhovující, pokud je kritérium poranění hlavy HIC15 menší než 1 000. Kromě toho musí být dosaženo bočního vnějšího vychýlení figuríny alespoň 800 mm od počáteční polohy chodce při umístění 50% poloviny šířky vozidla.

2.2 Scénář B

Požadavky kolizního scénáře B se hodnotí prostřednictvím zkoušky, která je prováděna za pomoci ležící figuríny. Je uvažována pozice figuríny příčně k ose koleje s vychýlením a pozice, kdy figurína leží na ose koleje nohama směrem k vozidlu.

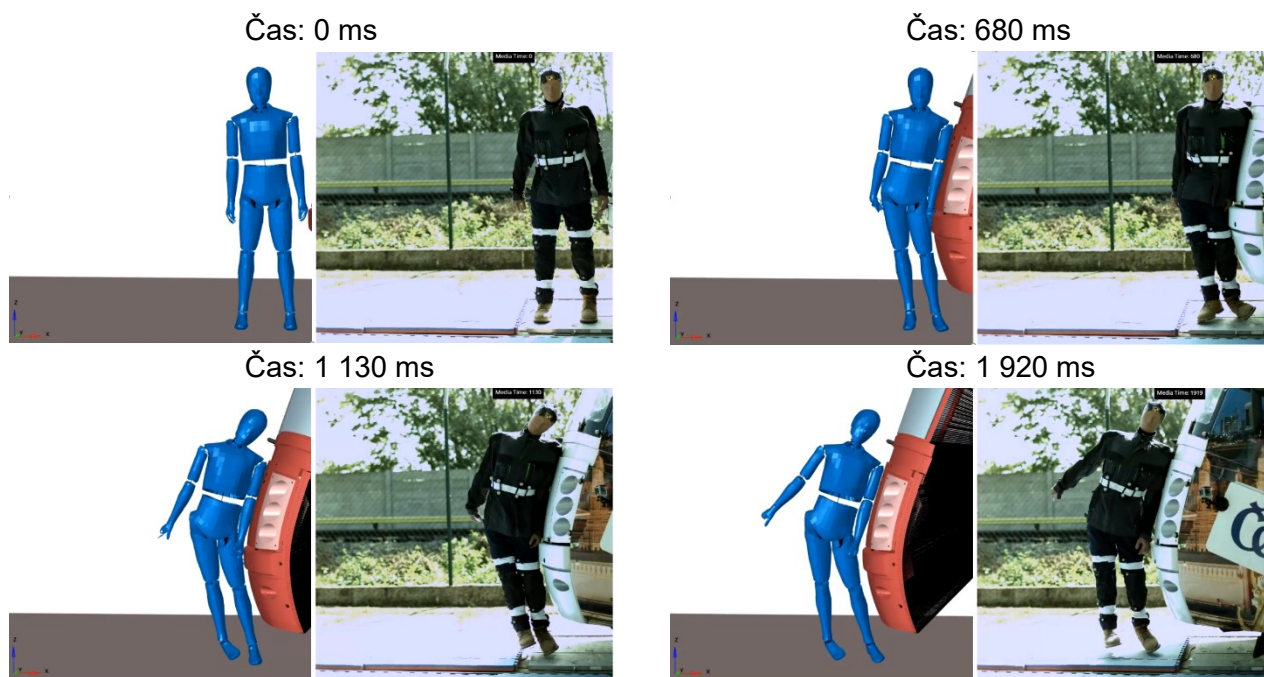
Konstrukce čela vozidla je vyhovující, pokud nedojde k oddělení nebo rozdrčení končetin, hrudníku a/nebo hlavy, a pokud nedojde ke kontaktu s koly.

3 MOŽNOSTI VALIDACE MODELU FIGURÍNY

Jak již bylo výše uvedeno, pro potřeby numerických simulací je třeba mít validovaný model figuríny. To je ovšem diskutabilní požadavek, neboť validace takového modelu se provádí vzhledem k výsledkům zkoušek s fyzickou figurínou. Validované fyzické figuríny běžně používané v automobilovém průmyslu jsou sedící. Stojící fyzická figurína validovaná pro boční náraz však není k dispozici.

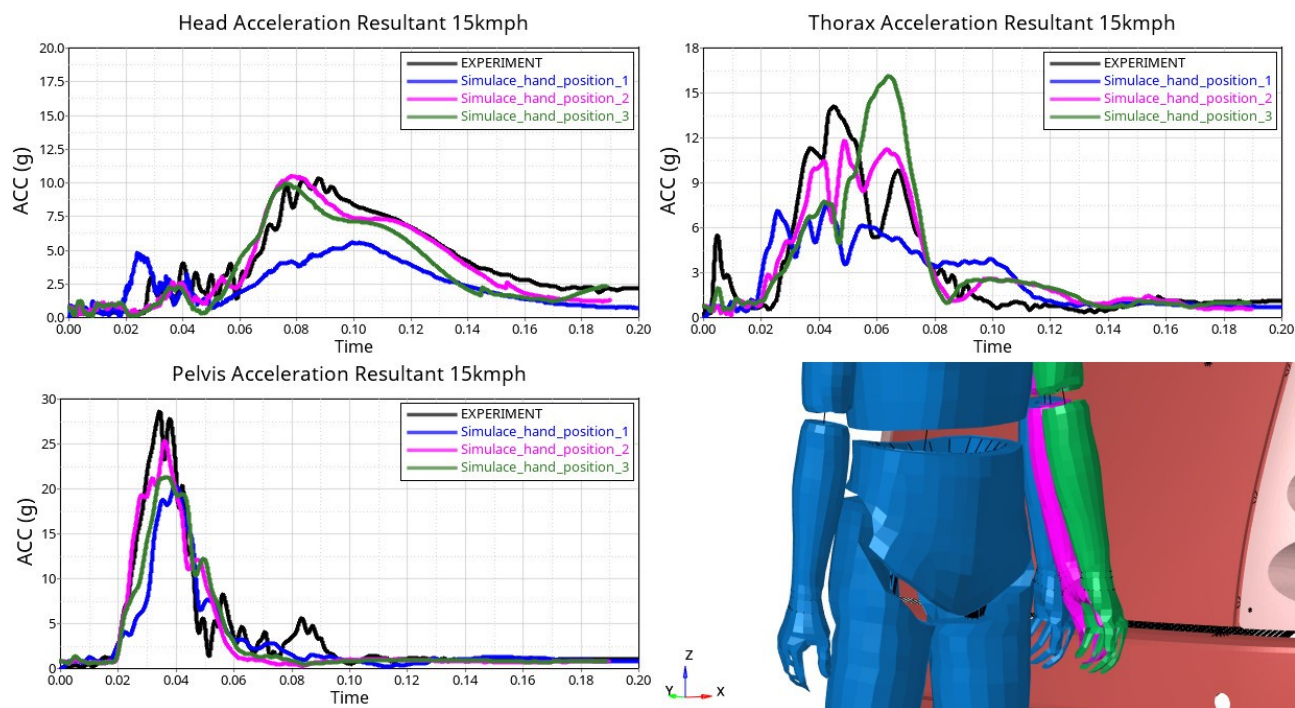
V rámci projektu „Analýza nehodových dějů chodec tramvaj – validace simulačních modelů“ byl učiněn pokus o validaci modelu figuríny, s tím omezením, že mohla být využita pouze sedící fyzická figurína určená pro čelní nárazy, která byla doplněna o tzv. „pedestrian kid“. Byly provedeny zkoušky s pěti typy tramvají 15T, 14T, T3R.P, KT8D5R.N2P a T6A5, které zajistil Dopravní podnik hlavního města Prahy. Zkoušky byly provedeny na rovné vodorovné koleji pro čelní i boční náraz. Všechny tramvaje a pozice fyzické figuríny byly testovány při rychlosti nárazu 5, 10, 15 a 20 km/h.

Průběh zkoušek byl následně modelován pomocí několika solverů. Na obrázku 3 je uveden příklad výsledku. Jedná se o porovnání výsledků numerického modelu a zkoušky bočního nárazu tramvaje 14T do stojící figuríny při rychlosti 15 km/h.



Obr. 3 Porovnání výsledků numerického modelu a zkoušky bočního nárazu tramvaje 14T do stojící figuríny při rychlosti 15 km/h

Při provádění numerických simulací se projevil významný vliv polohování figuríny. Tento vliv je patrný z obr. 4, který zachycuje průběhy zrychlení jednotlivých částí figuríny v závislosti na počáteční poloze levé ruky. Jsou patrné významné odlišnosti v průběhu zrychlení hlavy při relativně malé změně pozice ruky. Toto zrychlení je rozhodující při hodnocení poranění hlavy pomocí kritéria HIC15, což představuje legislativní požadavek. Nejen z tohoto důvodu je hodnocení srážky pomocí validovaného modelu figuríny považováno za diskutabilní.



Obr. 4 Vliv pozice ruky na výsledná zrychlení.

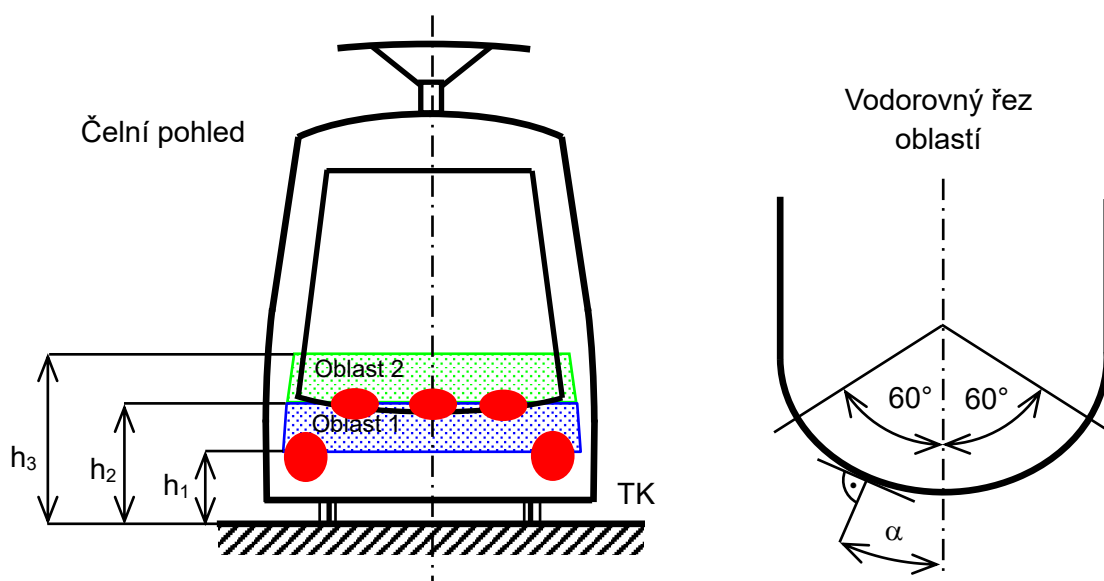
4 PŘÍSTUP DLE AUTOMOBILOVÉHO PRŮMYSLU

Z výše uvedených důvodů se jako vhodné jeví převzetí přístupu z automobilového průmyslu, který je dán nařízením č. 78/2009 [4]. Jsou požadovány testy s použitím makety dolní části nohy, makety horní části nohy, makety hlavy dítěte a makety hlavy dospělého (viz obr. 5). Pro testy se namísto celé figuríny používají pouze uvedené segmenty (makety).

	1	Lower leg form to bumper test (Chapter II)
	2	Upper leg form to bumper test (Chapter III)
	3	Upper leg form to bonnet leading edge test (Chapter VI)
	4	Child/small adult head form to bonnet top test (Chapter V)
	5	Adult head form to windscreen test (Chapter VI)
	6	Child/Small Adult and Adult head forms to bonnet top tests (Chapter VII)

Obr. 5 Testy pomocí segmentů; převzato z [5]

Co se týče přístupu, který se používá v automobilovém průmyslu, vyžaduje se od kapoty automobilu včetně čelního skla omezená odezva poměřovaná kritériem poranění hlavy (HIC). Ve většině oblasti, kam může hlava dopadat, je omezena na $HIC = 1\,000$ a ve zbytku na $HIC = 2\,000$. Pokud jde o scénář A, mohl by být přístup dle automobilového průmyslu použit i pro tramvaje a lehká kolejová vozidla. Přední část tramvaje lze rozdělit do dvou oblastí v závislosti na rozměrech lidského těla. První (dolní) oblast odpovídá dítěti nebo malému dospělému a druhá dospělému. Pro testování první zóny by mohl být použit model hlavy dítěte a pro testování druhé zóny model hlavy dospělého. Horizontální úhel k vektoru rychlosti tramvaje $\alpha > 60^\circ$ je považován za dostatečně velký k vychýlení nárazujícího těla k tomu, aby nezpůsobil vážnější zranění. Navrhované oblasti a odpovídající kritéria jsou uvedeny na obr. 6.



Oblast	Hranice	Impaktor	Kritérium
1	$h_1 = 1.0 \text{ m}$ $h_2 = 1.5 \text{ m}$ $\alpha \leq 60^\circ$	ISO dítě 3.5 kg	HIC < 1 000 na 70% oblasti HIC < 2 000 na 25% oblasti nehodnotí se na 5% oblasti*)
2	$h_2 = 1.5 \text{ m}$ $h_3 = 2.0 \text{ m}$ $\alpha \leq 60^\circ$	ISO dospělý 4.5 kg	HIC < 1 000 na 70 % oblasti HIC < 2 000 na 25 % oblasti nehodnotí se na 5 % oblasti*)

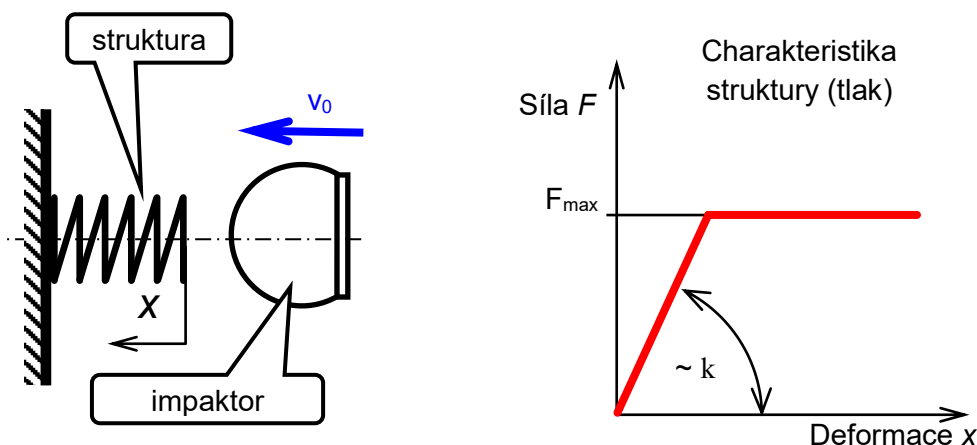
*) Protože skutečná konstrukce musí obsahovat části, které musí být instalovány (např. světla, stěrače čelního skla atd.; naznačeno v obrázku červeně), je z hodnocení vyloučeno 5 % plochy oblasti.

Obr. 6 Převzetí přístupu z automobilového průmyslu; zdroj [5]

Předpokládá se provedení doporučených testů pro rychlost impaktoru 20 km/h, protože se jedná o rychlost uvedenou v [2] pro scénář A. Dále se doporučuje nechat impaktor padat kolmo k povrchu tramvaje. Jde o zjednodušení, které umožňuje snazší provedení testů.

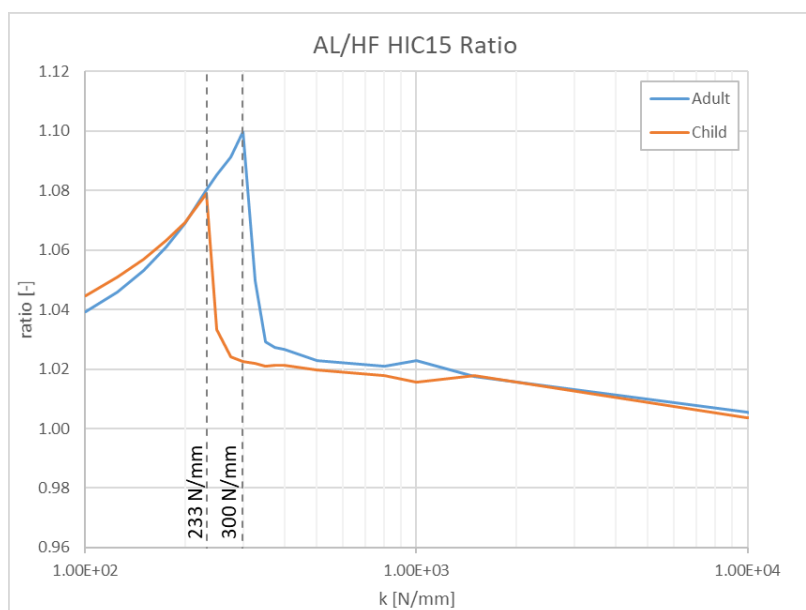
4.1 Možnost použití zjednodušeného impaktoru

Předchozí přístup předpokládá použití nákladných plnohodnotných impaktorů (head form impactor) používaných laboratořemi působícími v oblasti automobilového průmyslu. V tomto odstavci je diskutována možnost použití zjednodušeného impaktoru z hliníkové slitiny. V článku [5] byla provedena analýza odezvy ideálně elasticko-plastické struktury při dopadu plnohodnotného (HF) a zjednodušeného AL impaktoru. Charakteristiky této struktury jsou znázorněny na obr. 7. Tuhost k představovala proměnný parametr. Maximální síla F_{max} odpovídá konstantnímu zrychlení (cca 146 g), které způsobuje $HIC_{15} = 1\,000$.



Obr. 7 Chování uvažované ideálně elasto-plastické struktury; zdroj [5]

Výsledky této analýzy jsou patrné z obrázku 8. Je zřejmé, že rozdíl v získané hodnotě HIC15 je menší než 10 %, pokud je použit impaktor z hliníkové slitiny (AL) místo plnohodnotného (HF). Náhlé změny křivek (pro $k = 233$ a 300 N/mm) jsou dány dosažením meze plasticity struktury, tj. dosažením síly F_{max} .

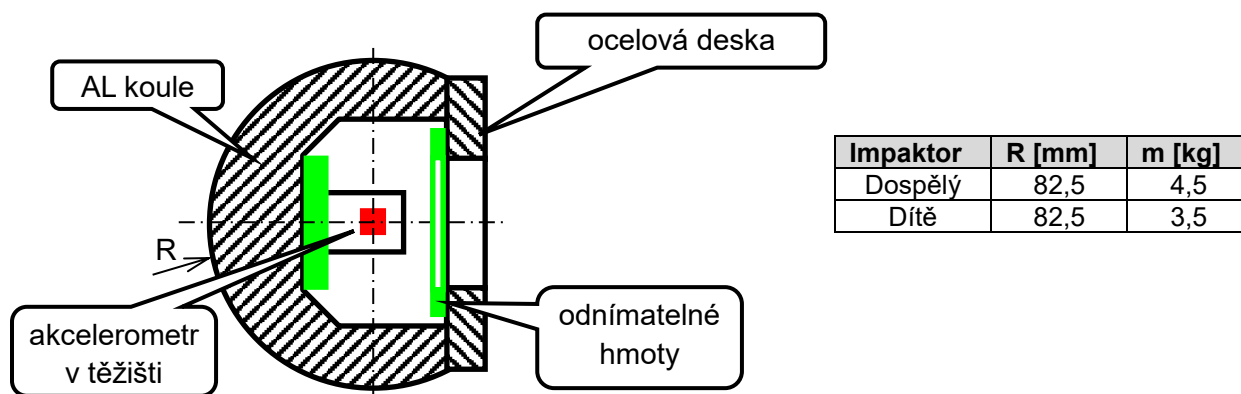


Obr. 8 Poměr odezvy zjednodušeného (AL) a plnohodnotného (HF) impaktoru – impaktor odpovídající hlavě dospělého (Adult) a dítěte (Child); zdroj [5]

5 VYBAVENÍ POTŘEBNÉ PRO PROVEDENÍ ZKOUŠEK

Testování čel tramvají a lehkých kolejových vozidel pomocí přístupu používaného v automobilovém průmyslu vyžaduje vlastnictví příslušného impaktoru a zařízení na jeho urychlování. Taková zařízení existují ve vybavených laboratořích, což však předpokládá, do těchto laboratoří dopravit testované vozidlo. V tomto ohledu se (vzhledem velkým k rozměrům) jeví jako reálné tímto způsobem testovat pouze části čelních partií kolejových vozidel.

Vzhledem k relativně nízké rychlosti nárazu se jeví jako nejsnazší pro tento typ zkoušek urychlovat impaktor pomocí kyvadlového závěsu, který byl použit v kombinaci se zjednodušeným impaktorem např. při zkouškách tramvajového skla [6]. Jiná možnost realizace zjednodušeného impaktoru je schematicky znázorněna na obr. 9, přičemž tato konstrukce umožňuje změnu hmotnosti odejmutím příslušných částí. Pro testování menších součástí čelních partií (např. laminátové nebo sendvičové díly obložení čela) lze využít i padostroje.



Obr. 9 Schéma zjednodušeného AL impaktoru s možností změny hmotnosti; zdroj [5]

6 ZÁVĚR

Proces splnění konstrukčních požadavků začleněný do připravované legislativní úpravy v podobě budoucí normy EN 17420 může v určitých případech vést k nutnosti použití validovaného numerického modelu figuríny. Uvažovaný scénář (scénář A) předpokládá náraz čela tramvaje do boku jdoucího chodce. Validaci modelu figuríny však není možné provést, jelikož prozatím není k dispozici vhodná (fyzická) figurína, která by sama o sobě byla validována vzhledem k chování lidského těla.

Během provedených simulací se ukázalo, že výsledné průběhy zrychlení jsou citlivé na polohování figuríny. Z tohoto důvodu nelze očekávat vysokou opakovatelnost zkoušek a je otázkou, do jaké míry budou numerické simulace požadované budoucí normou odrážet realitu.

Naproti tomu v automobilovém průmyslu existuje dlouhodobě používaný přístup, který nehodnotí komplexní chování figuríny/chodce při střetu s vozidlem, ale přímo definuje rychlost dopadu jednotlivých segmentů, což přispívá k jednoznačnosti a opakovatelnosti zkoušek a simulací. Tento přístup je z hlediska stanovení kritéria HIC považován za vhodnější.

Na příkladu chování jednoduché elasto-plastické struktury bylo ukázáno, že i zjednodušená verze impaktoru (AL impaktor) v kombinaci s kyvadlovým mechanismem může s uspokojivou přesností posloužit k testování čela kolejového vozidla. Navíc má tento způsob tu výhodu, že je mobilní a není třeba testované vozidlo složitě dopravovat do zkušební laboratoře.

Pokud budou pro splnění požadavků scénáře A uplatňovány výhradně geometrické požadavky výše uvedené nové legislativy, lze očekávat, že čelní partie vozidel si budou svým tvarem navzájem velmi podobné.

Tento příspěvek vznikl díky podpoře projektu CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_026/0008401 „Analýza nehodových dějů chodců tramvaj – validace simulačních modelů“.



Literatura

- [1] EN15227:2020. *Railway applications – Crashworthiness requirements for rail vehicles.*
- [2] TR 17420:2020. *Railway applications – Vehicle end design for trams and light rail vehicles concerning pedestrian safety.*
- [3] prEN 17420:2025. *Railway applications – Vehicle front design for trams with respect to pedestrian safety.*
- [4] Regulation (EC) No 78/2009 of the European Parliament and of the Council of 14 January 2009 on the type-approval of motor vehicles for the protection of pedestrians and other vulnerable road users,

- amending Directive 2007/46/EC and repealing Directives 2003/102/EC and 2005/66/EC. In: *Official Journal of the European Union*. L 35, 4.2.2009.
- [5] JEŽDÍK, R., KEMKA, V., KOVANDA, J., LOPOT, F., PURŠ, H., HÁJKOVÁ, B. *Various Approaches to Reduce Consequences of Pedestrian–Tram Front End Collision*. Online. PROMET – Traffic&Transportation. Vol. 35 (2023), no. 2, s. 133–147. ISSN 1213–2489. Dostupné z: <https://doi.org/10.7307/ptt.v35i2.81>. [citováno 2025-06-05].
- [6] JEŽDÍK, R. Stanovení tuhostních charakteristik čelního skla tramvaje. In: *Súčasné problémy v koľajových vozidlách – PRORAIL 2019: XXIV. medzinárodná konferencia, zborník prednášok, diel I*. Žilina: VTS pri ŽU v Žiline, 2019, s. 283–290. ISBN 978-80-89276-58-5.

Zasláno / received: 11. 06. 2025, přijato / accepted: 27. 07. 2025, publikováno / published: 17. 09. 2025.

Příspěvek recenzovali / The paper was reviewed by: Ing. Stanislav Špírk, Ph.D. (Západočeská univerzita v Plzni, Regionální technologický institut), Ing. Jan Pokorný, Ph.D. (Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera).