



Empirické výpočty v analýze silničních nehod – případová studie

Empirical Calculations in Crash Analysis – A Case Study

Roman Mikulec^{1*}, Jakub Motl¹, Marek Semela²

¹Centrum dopravního výzkumu, v.v.i., Brno

²Ústav soudního inženýrství VUT

Abstrakt

Simulační programy jsou nejrozšířenějším prostředkem, používaným v rámci analýzy a rekonstrukce silničních nehod. Výsledky simulačního výpočtového modelování by měly být ve shodě s empirickými výpočty, které je vhodné použít jako podklad vstupních hodnot simulačních programů či pro komparaci s kontrolními veličinami získanými výpočtovým simulačním modelováním. Rovněž je nutné brát ohled na limitace simulačních programů, jejichž samotné použití nelze doporučit při řešení některých typů nehod z důvodu vysoké citlivosti na změnu vstupních údajů. Tato skutečnost byla znázorněna na konkrétní dopravní nehodě, při které došlo k několikanásobnému převrácení vozidla přes střechu, kterému předcházela fáze letu. Rychlost vozidla na počátku nehodového děje bylo možné stanovit empirickým výpočtem a samotný pohyb vozidla bylo možné do jisté míry modelovat s využitím simulačního programu a oba přístupy kombinovat, nebo komparovat výsledky.

Klíčová slova: Analýza nehod, empirické výpočty, simulační modelování, převrácení vozidel.

Abstract

Simulation programs are an increasingly widespread tools used in crash analysis and reconstruction. However, simulation modelling results should always be in agreement with empirical calculations, which should be used as a basis for the input values of simulation programmes or for comparison of outcomes gained from simulations. It is also necessary to consider the limitations of simulation programs, which cannot be recommended as the sole method for some crash types. This was illustrated in a particular crash in which a vehicle rolled over several times, preceded by a flight phase. The vehicle's speed at the beginning of the crash, could be determined by empirical calculation, and the vehicle's motion could be modelled to some extent using a simulation program.

Keywords: Accident analysis, empirical calculations, simulation modeling, vehicle rollover.

1. ÚVOD

V současné době existuje díky značným pokrokům v oblasti výpočetní techniky řada simulačních programů, používaných za účelem analýzy dopravních nehod. Tyto programy v sobě obsahují trojdimenzionální matematické modely vozidel, pomocí kterých je možné provést mj. i dopředný (kinetický) výpočet pohybu vozidla. Simulační modelování tedy nabízí moderní přístup k analýze nehodového děje.

Tyto programy však stále mají své limity, například v případech, kdy dojde k převrácení (rotaci) vozidla přes střechu kolem podélné nebo příčné osy vozidla alespoň o jednu čtvrt otáčku (tj. 90°). Pohyb vozidla při těchto nehodách může být značně komplexní a jeho modelování pomocí běžně dostupných simulačních

programů, mezi které lze zařadit např. PC-Crash nebo Virtual Crash, je komplikováno řadou faktorů, mezi kterými lze jmenovat následující:

- Programy využívají zjednodušený model vozidla, který neumožňuje zohlednit jednotlivé struktury vozidla (např. výztuhy, rozdílné materiály, použité při konstrukci vozidla aj.).
- Programy v sobě nemají matematický model, který by umožnil zohlednit pohyb vozidla po nepevném povrchu (zejména s ohledem na komplexní vzájemnou interakci částic např. zeminy při jejich kompresi přetáčejícím se vozidlem).
- I s využitím geodetického zaměření povrchu pro vytvoření 3D polygonu nelze vytvořit naprosto přesný model povrchu,

Dodáno do redakce: 16. 11. 2022

Recenzní řízení: od 16. 11. 2022 do 22. 11. 2022

DOI: <http://dx.doi.org/10.13164/Sl.2022.3.34>

*Korespondenční adresa: roman.mikulec@cdv.cz

po kterém se vozidlo pohybovalo (příčměž tvar povrchu může být vlivem pohybu vozidla při nehodovém ději změněn a jeho přesný stav před nehodou již není možné zjistit).

- Uvedené limitace komplexně ovlivňují výběhy vozidel.

Pro tyto a další případy tak mají stále v rámci analýzy nehodového děje nezastupitelnou roli empirické výpočty, založené



Obr. 1 Místo dopravní nehody.
Fig. 1 Accident scene.



Obr. 2 Místo dopadu vozidla na zem a přetočení vozidla.
Fig. 2 Location of vehicle ground impact and rollover.



Obr. 3 Poškození vozidla.
Fig. 3 Vehicle damage.

na měřeních se skutečnými vozidly (ať už jízdnicích zkouškách, nebo destruktivních testech), které v sobě mohou ve své komplexnosti zahrnovat mnohá zjednodušení, která se ukazují v případě neznalosti širokého rozsahu vstupních hodnot ovlivňujících pohyb objektů v takových případech jako vhodná.

V rámci tohoto příspěvku bude na případové studii ukázán jeden z možných postupů stanovení výchozí rychlosti vozidla, se značně komplexním pohybem v rámci nehodového děje, složený z fáze letu a fáze převrácení. Samotná analýza byla provedena s využitím empirických vztahů a pohyb byl následně modelován i pomocí simulačního programu s rychlostmi, které byly empirickými výpočty stanoveny.

2. PŘÍPADOVÁ STUDIE

2.1 Popis dopravní nehody

Při této dopravní nehodě došlo k vyjetí vozidla Volkswagen Golf mimo pozemní komunikaci ve vysoké rychlosti, kterému následovala fáze letu vozidla a po jeho dopadu zpět na zem došlo k několikanásobné rotaci (přetočení) vozidla kolem jeho podélné osy. Ze stop a pořízené dokumentace bylo patrné, že se vozidlo pohybovalo ve fázi letu po cca 45 m, od prvních stop dopadu po konečnou polohu vozidla bylo naměřeno cca 75 m (obr. 1 až obr. 3).

2.2 Empirické výpočty

V případě předmětné nehody je cílem zejména stanovení rychlosti vozidla na počátku fáze letu. V tomto případě lze využít zpětný způsob analýzy, resp. výpočtu (tedy od konečné polohy vozidla po počátek nehodového děje).

Jak je uvedeno např. ve studiích (Grimes, 2006, Funk, 2012), při analýze nehod, u kterých došlo k převrácení vozidla, lze pohyb vozidla rozdělit do tří fází:

- od počátku kritické události až po začátek smyku, který vede k převrácení,
- od začátku smyku až po bod zvratu (resp. okamžik převrácení),
- od počátku převrácení do konečné polohy.

Z pohledu analýzy předmětné nehody je významná zejména třetí fáze pohybu vozidla, tedy od počátku převrácení do konečné polohy vozidla. Pro výpočet rychlosti vozidla na počátku převrácení lze využít empirický vzorec, založený na koeficientu tření, uvedený např. ve studii (Cofone, 2002). Hodnota tohoto koeficientu „tření“ byla experimentálně zjištěna pomocí reálných jízdnicích zkoušek, při kterých došlo k převrácení vozidla.

Ve studii (Arndt, 2011) byla uvedena hodnota koeficientu tření při převrácení v rozmezí cca 0,38 až 0,50 (průměrná hodnota byla uvedena cca 0,44). S podobnými výsledky přišla rovněž studie (Stevens, 2011), která hodnotu tohoto koeficientu v rozmezí 0,33 až 0,57. Hodnoty koeficientu tření při převrácení byly obecně pozorovány vyšší při pohybu vozidla po zemině (zejména při první otočce vozidla).

Samotný empirický vztah má následující podobu (pro případy, ve kterých je mezi místem inicializace převrácení a konečnou polohou vozidla výškový rozdíl):

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot (f \cdot s + h)}, \quad (1)$$

kde:

- v rychlost vozidla [m/s],
- g tíhové zrychlení [m/s²],
- s dráha, na které došlo k převracení vozidla [m],
- f koeficient tření při převracení (lze uvažovat v rozsahu 0,39 až 0,50) [-],
- h výškový rozdíl (kladná hodnota pro stoupání, záporná pro klesání) [m].

Na základě jízdních zkoušek s převracením vozidel bylo dále vyzorováno, že je možné stanovit průměrnou vzdálenost, kterou vozidlo urazí na jedno otočení na přibližně 11 m. Ačkoliv se jedná spíše o odhad, založený na řadě případů, při kterých byla známa jak vzdálenost, tak počet otáček, které vozidlo vykonalo, je možné jej v praxi použít. Dále bylo pozorováno, že vzdálenost, kterou vozidlo urazí při první otáčce bývá delší oproti poslední nejkratší, která se blíží obvodu vozidla.

Podobné hodnoty vzdáleností byly rovněž prezentovány ve výsledcích studie (Luepke, 2011), která uvádí 7,6 až 10 m a 7,9 až 8,5 m, které vozidlo urazí za jednu otočku. Ve studii (Altman, 2002) bylo uvedeno, že u vozidel, které vykonají jednu nebo méně otáček byla vzdálenost, kterou vozidlo při převracení vykonalo přibližně 14 m.

Na základě stop zdokumentovaných na místě předmětné nehody, vzdálenosti počátku převracení od konečné polohy vozidla (v případě této nehody, lze na základě geodetického zaměření uvažovat vzdálenost cca 64 m, přičemž se vozidlo pohybovalo v klesání, které činilo cca 2,5 m) lze pomocí výše zmíněné rovnice (1) stanovit rychlost vozidla na počátku převracení následovně:

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot (f \cdot s + h)} = \sqrt{2 \cdot g \cdot (0,44 \cdot 64,0 - 2,5)} = 22,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 81 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}.$$

Jak bylo zmíněno výše, dráha od počátku převracení po konečnou polohu vozidla byla cca 64 m. Dle pravidla (resp. zásady) uvedené výše provede vozidlo v průměru jednu otáčku na dráze cca 11 m z čehož plyne, že by vozidlo mělo vykonat cca 6 otáček.

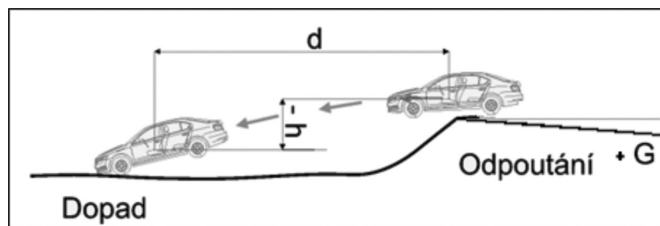
Přetočení vozidla předcházela fáze letu. V literatuře (Fricke, 2010) je pro výpočet tohoto typu pohybu vozidla uveden následující vzorec:

$$v = d \sqrt{\frac{g}{2 \cos \theta (d \sin \theta - h \cos \theta)}}, \quad (2)$$

kde:

- v rychlost vozidla na počátku odpoutání [m/s],
- g tíhové zrychlení [m/s²],
- θ sklon (úhel), ve kterém se vozidlo před odpoutáním pohybovalo [°],
- d vzdálenost, na které se vozidlo mezi odpoutáním a dopadem pohybovalo [m],
- h výškový rozdíl pohybu těžiště vozidla (kladná hodnota pro stoupání, záporná pro klesání) [m].

Mezi poslední zadokumentovanou stopu na vyvýšeném terénu a první stopou zarytí vozidla na počátku jeho převracení byla změřena vzdálenost cca 44 m, celkové převýšení mezi těmito



Obr. 4 Možný pohyb vozidla (těžiště) a odměřované hodnoty u nehod, při kterých dojde k odpoutání vozidla od země.
Fig. 4 Possible movement of the vehicle (centre of mass) and measured values in crashes where the vehicle takes off.

stopami bylo cca 3,5 m (přičemž stopa po dopadu vozidla byla níže než poslední stopa před odpoutáním vozidla od země). Před odpoutáním vozidla od povrchu se vozidlo pohybovalo ve stoupání cca 8,4% (tj. cca 4,8°). Rychlost vozidla před jeho odpoutáním od země lze stanovit pomocí výše zmíněné rovnice (2) následovně:

$$v = d \sqrt{\frac{g}{2 \cos \theta (d \sin \theta - h \cos \theta)}} = 75 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \cos 4,8^\circ \cdot (44 \cdot \sin 4,8^\circ - (-3,5) \cdot \cos 4,8^\circ)}{}} = 36,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 131 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}.$$

Tato rychlost byla dále použita jako vstupní parametr simulačního modelování předmětné nehody.

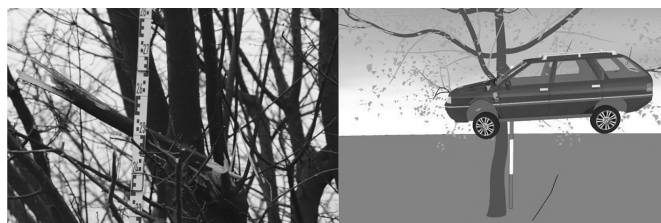
2.3 Simulační modelování

Na základě provedených výpočtů bylo možné u předmětné dopravní nehody provést rovněž simulační modelování nehodového děje. Vstupními parametry byla jak stanovená rychlost, tak informace



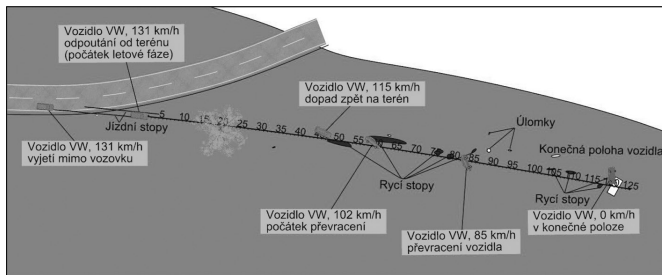
Obr. 5 Pohyb vozidla v simulačním programu, s využitím rychlostí, stanovených empirickými vzorci.

Fig. 5 Vehicle motion in the simulation program, using speeds determined by empirical formulas.



Obr. 6 Výška, ve které se vozidlo pohybovalo kolem stromu (vlevo – zaměření na místě nehody, vpravo – simulační modelování).

Fig. 6 Height at which the vehicle moved around the tree (left – on-scene measurement, right – simulation modelling).



Obr. 7 Přehled nehodového děje.
Fig. 7 Accident overview.

o rozměrech a hmotnosti předmětného vozidla, získané z veřejně dostupných databází. Simulační modelování bylo provedeno na 3D polygonu, získaného geodetickým zaměřením místa předmětné DN.

Na místě předmětné nehody bylo zjištěno, že se předmětné vozidlo ve fázi letu pohybovalo kolem koruny stromu, přičemž došlo ke kontaktu s větvemi stromu ve výšce cca 2,5 m. Podobného výsledku bylo možné dosáhnout při použití empiricky stanovené rychlosti vozidla v simulačním modelování. V dobré shodě byla rovněž vzdálenost, ve které se vozidlo pohybovalo ve fázi letu.

V okamžiku dopadu mělo dle simulačního modelování vozidlo stále rychlost cca 115 km/h, přičemž samotné převrácení začalo až po sunutí vozidla po povrchu na vzdálenosti cca 15 m, a rychlost na počátku převrácení byla stále téměř 100 km/h, což se liší od výsledků získaných výpočtem (tj. cca 81 km/h). Simulačním modelováním však bylo dosaženo předpokládaného počtu otáček na dané dráze – v rámci simulace se vozidlo přetočilo cca 6krát, což je v souladu s předpokládaným počtem.

3. DISKUSE A ZÁVĚR

Simulační programy jsou s vývojem výpočetní techniky stále častějším a rozšířenějším nástrojem, který lze použít v rámci analýzy silničních nehod. Obecně je cílem simulačního modelování stanovení technicky přijatelného rozsahu vstupních parametrů (podstatných veličin), které odpovídají výsledkům provedeného experimentálního měření, resp. které jsou v souladu se známými důsledky (např. pohyb vozidla po zadokumentovaných stopách do konečné polohy).

Mezi nejrozšířenější simulační programy se v současnosti řadí Virtual CRASH a PC-Crash. Pro technicky přijatelný výstup simulačního modelování je do programů nutné zadat korektní vstupní data, přičemž při modelaci pohybu vozidla je nutné zadat základní parametry, týkající se modelovaného vozidla, jeho ovládání a prostředí (okolí), kterým se vozidlo pohybuje.

Při používání těchto programů je však nutné brát v potaz jejich limitace a výsledky simulačního modelování je vhodné ověřit dalšími metodami, jako například empirickými výpočty.

Na uvedeném příkladu byl ukázán postup stanovení výchozí rychlosti vozidla se značně komplikovaným způsobem pohybu, a to jak s využitím empirických výpočtů, tak následným simulačním modelováním, založeným právě na provedených empirických výpočtech.

Tímto způsobem bylo dosaženo dobré shody ve výšce, ve které se vozidlo pohybovalo kolem stromu v průběhu simulačního modelování a stopami, zadokumentovanými na místě dopravní

nehody. Následný pohyb vozidla, tedy jeho dopad na zem a následné několikanásobné přetočení přes střechu kolem jeho podélné osy nebylo možné simulačním modelováním dosáhnout. Nelze přitom vyloučit, že pohyb, resp. rotace vozidla byla ovlivněna již jeho interakcí s větvemi stromu, což bylo v simulačním modelování zanedbáno.

Ačkoliv by zřejmě bylo možné dosáhnout požadovaného pohybu vozidla použitím simulačního programu, bylo by tak možné pouze značnými zásahy např. do koeficientů tření, nebo samotného tvaru (modelu) vozidla, a technickou přijatelnost těchto zásahů by nebylo možné jednoznačně ověřit – v takovém případě by se jednalo spíše o animaci, než simulaci pohybu vozidla.

Problém v tomto případě spočívá v použití zjednodušeného modelu vozidla simulačními programy, který nemá možnost plně zohlednit konstrukční uspořádání vozidla a jednotlivé použité materiály na skutečném vozidle (jejichž mechanické vlastnosti není možné jednoduše ověřit, nebo zjistit). Rovněž deformace vozidla při pohybu karoserie po povrchu (resp. při kontaktu s povrchem vozovky, či terénem), je v rámci těchto simulačních programů v zásadě ignorována a pro její zahrnutí by bylo nutné vytvoření a uživatelská editace všech kontaktů mezi vozidlem a terénem. U samotného (nezpevněného) terénu pak při kontaktu s karoserií vozidla nedochází k jeho deformaci.

Lze tedy konstatovat, že použití empirických vzorců je vhodné nejen pro početní analýzu nehodového děje, ale může rovněž sloužit jako podklad pro simulační modelování. Opačný postup, tedy stanovení vstupních hodnot empirických výpočtů pomocí simulačního modelování u nehod se značně komplikovaným způsobem pohybu, jakými jsou nehody s převrácením vozidla, však nelze v současnosti doporučit.

Tento článek byl vytvořen za finanční podpory Ministerstva dopravy v rámci programu dlouhodobého koncepčního rozvoje výzkumných organizací.

4. LITERATURA

- [1] GRIMES, D. W., *et al.* Analyzing The Trip-Phase of Soft-Soil Rollovers. *SAE Technical Paper*, 2006.
- [2] LUEPKE, P., ASAY, A. 2011. Comparing Dolly Rollover Testing to Steer-Induced Rollover Events for an Enhanced Understanding of Off-Road Rollover Dynamics. *SAE International Journal of Passenger Cars – Mechanical Systems*. *SAE International*, 4(1), 848–869.
- [3] ALTMAN, S., SANTISTEVAN, D., HITCHINGS, C., WALLINGFORD, J. G., GREENLEES, B. *A Comparison of Rollover Characteristics for Passenger Cars, Light Duty Trucks and Sport Utility Vehicles*. Dostupné z: <https://www.sae.org/content/2002-01-0942/>.
- [4] ARNDT, M. W., ARNDT, S. M., STEVENS, D. Drag factors from rollover crash testing for crash reconstructions. In: *ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection*, 2011. p. 77–90.
- [5] STEVENS, D. C., ARNDT, S., WAYNE, L., ARNDT, M., ANDERSON, R., MANNING, J., ANDERSON, R. *Rollover Crash Test Results: Steer-Induced Rollovers*. Dostupné z: <https://www.sae.org/content/2011-01-1114/>.
- [6] CONROY, C., *et al.* Rollover crashes: predicting serious injury based on occupant, vehicle, and crash characteristics. *Accident*

- Analysis & Prevention*, 2006, 38.5: 835–842.
- [7] FUNK, J., WIRTH, J., BONUGLI, E., WATSON, R., ASAY, A. *An Integrated Model of Rolling and Sliding in Rollover Crashes*. 2012. ISSN 0148-7191. Dostupné z: doi:10.4271/2012-01-0605.
- [8] COFONE, J. N. Rollover Crashes of Motor Vehicles and Heavy Trucks. *Institute of Police Technology and Management, University of North Florida*, 2002.
- [9] FRICKE, L. *Traffic crash reconstruction*. 2nd ed. Evanston: Northwestern University Center for Public Safety, 2010, VIII, 824 s.: ill. ISBN 0-912642-03-3.
- [10] SEMELA, M. *Systémové pojetí analýzy silničních nehod: The System Approach to Road Accident Analysis*. Habilitační práce. Brno, 2018. 139 s. Vysoké učení technické v Brně.

Správná citace:

MIKULEC, R., MOTL, J., SEMELA, M. Empirické výpočty v analýze silničních nehod – případová studie. *Soudní inženýrství*, 2022, 33(3–4), 34–38. DOI: <http://dx.doi.org/10.13164/SI.2022.3.34>. ISSN 1211-443X.