

Experimentální **A**nalýza **N**apětí **2003**

STRENGTH CALCULATION OF TROLLEYBUS COMPOSITE DOORS AND THEIR EXPERIMENTAL TESTS

VÝPOČTY PEVNOSTI PLASTOVÝCH DVEŘÍ TROLEJBUSU A JEJICH EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ

Petr Kindelmann¹, Pavel Polach², Jiří Némět³

ŠKODA OSTROV Ltd. will implement composite doors into the vehicles, which will be included into its basic production program in the nearest future. Verification of the applicability of their supposed structural design was carried out in ŠKODA RESEARCH Ltd. by experimental tests on the real prototype of composite doors and by computer simulations. Simulation approach towards the determination the dynamic impact force during the fall of a standing passenger against the composite doors and the strength of composite doors is presented on the ŠKODA 14 Tr M trolleybus. In order to assess the impact force simulation of driving with the multibody ŠKODA 14 Tr M trolleybus model with a standing passenger was used applying alaska software. The strength assessment of composite doors was realized by tests of doors in operation and by finite element method applying COSMOS/M software.

Keywords

Composite Doors, Multibody Model, Dynamic Impact Force, Finite Element Method

Úvod

Tradičním výrobcem silničních vozidel městské hromadné dopravy v České republice je společnost ŠKODA OSTROV s.r.o. Na vývoji a zdokonalování vlastností těchto dopravních prostředků se již několik desetiletí významně podílí ŠKODA VÝZKUM s.r.o. [1].

V rámci tzv. „plastového programu“ bude ŠKODA OSTROV s.r.o. v nejbližší době implementovat do vozidel svého základního výrobního programu mj. i plastové dveře. Ověřování vhodnosti jejich předpokládaného konstrukčního řešení se provádělo ve ŠKODA VÝZKUM s.r.o. experimentálními zkouškami na reálném prototypu plastových dveří i počítačovými simulacemi.

¹ Ing. Petr Kindelmann: ŠKODA VÝZKUM s.r.o., Výzkum materiálů a strojírenství; Tylova 57, 316 00 Plzeň, tel.: +420-378132968, e-mail: petr.kindelmann@skoda.cz

² Dr. Ing. Pavel Polach: ŠKODA VÝZKUM s.r.o., Výzkum materiálů a strojírenství; Tylova 57, 316 00 Plzeň, tel.: +420-378132046, e-mail: pavel.polach@skoda.cz

³ Ing. Jiří Némět: ŠKODA VÝZKUM s.r.o., Akreditované zkušebny; Tylova 57, 316 00 Plzeň, tel.: +420-378044430, e-mail: jiri.nemet@skoda.cz



Obr. 1 Trolejbus ŠKODA 14 Tr M

Na příkladu trolejbusu ŠKODA 14 Tr M (obr. 1) je uveden simulační přístup ke stanovení dynamické rázové síly při pádu stojícího cestujícího na plastové dveře a experimentální i simulační přístup k určení pevnosti dveří. Ke stanovení průběhu a extrému rázové síly byla simulována jízda trolejbusu a pád stojícího cestujícího na dveře v prostředí mechatronického softwaru **alaska** [7]. Určení pevnosti bylo provedeno experimentálním měřením na reálném prototypu dveří a výpočtem na MKP modelu dveří v softwaru COSMOS/M [8].

Požadavky na dveře dopravních prostředků

Jedním z kritérií bezpečnosti vozidla pro hromadnou přepravu osob jsou dostatečně pevné a správně fungující dveře. Dveře, stejně jako ostatní části karoserie vozidla, přicházející intenzivně do styku s agresivním prostředím (zejména v zimě, kdy se pro úpravu zejména městských vozovek používá chemický posyp). Možným řešením je využití kompozitů místo klasického ocelového plechu. Dalšími výhodami použití kompozitů je snadnější dosažení tvaru navrženého konstruktérem a levnější výroba.

Nástupní prostor ve vozidle městské hromadné dopravy je často, zejména v dopravní špičce, přeplněn cestujícími. Městský provoz se vyznačuje komplikovanou jízdou s častými průjezdy ostrými zatáčkami, vyhýbacími manévry i nerovnostmi vozovky. Dveře musí vydržet nejen statické síly, ale i dynamické síly vznikající v souvislosti s provozem vozidla a zajistit bezpečnost cestujících při nenadále dopravní situaci, při které může dojít i k pádu cestujícího na dveře.

Před zavedením montáže plastových dveří do vozidel v sériové výrobě je nutné provést provozní zkoušky, zkoušky pevnosti a životnosti a odolnosti dveří proti rázové síle. Při zkouškách odolnosti dveří proti rázové síle je zapotřebí stanovit maximální dynamickou sílu, kterou by měly dveře ještě přenést. Tuto sílu lze stanovit při prudkém vyhýbacím manévru, experimentálně samovolným pádem figuríny nebo s využitím počítačových simulací. Počítačové simulace jsou oproti experimentu mnohem dostupnější a zároveň se při jejich využití zamezí vzniku kritických situací, při kterých může být reálný test nebezpečný nebo

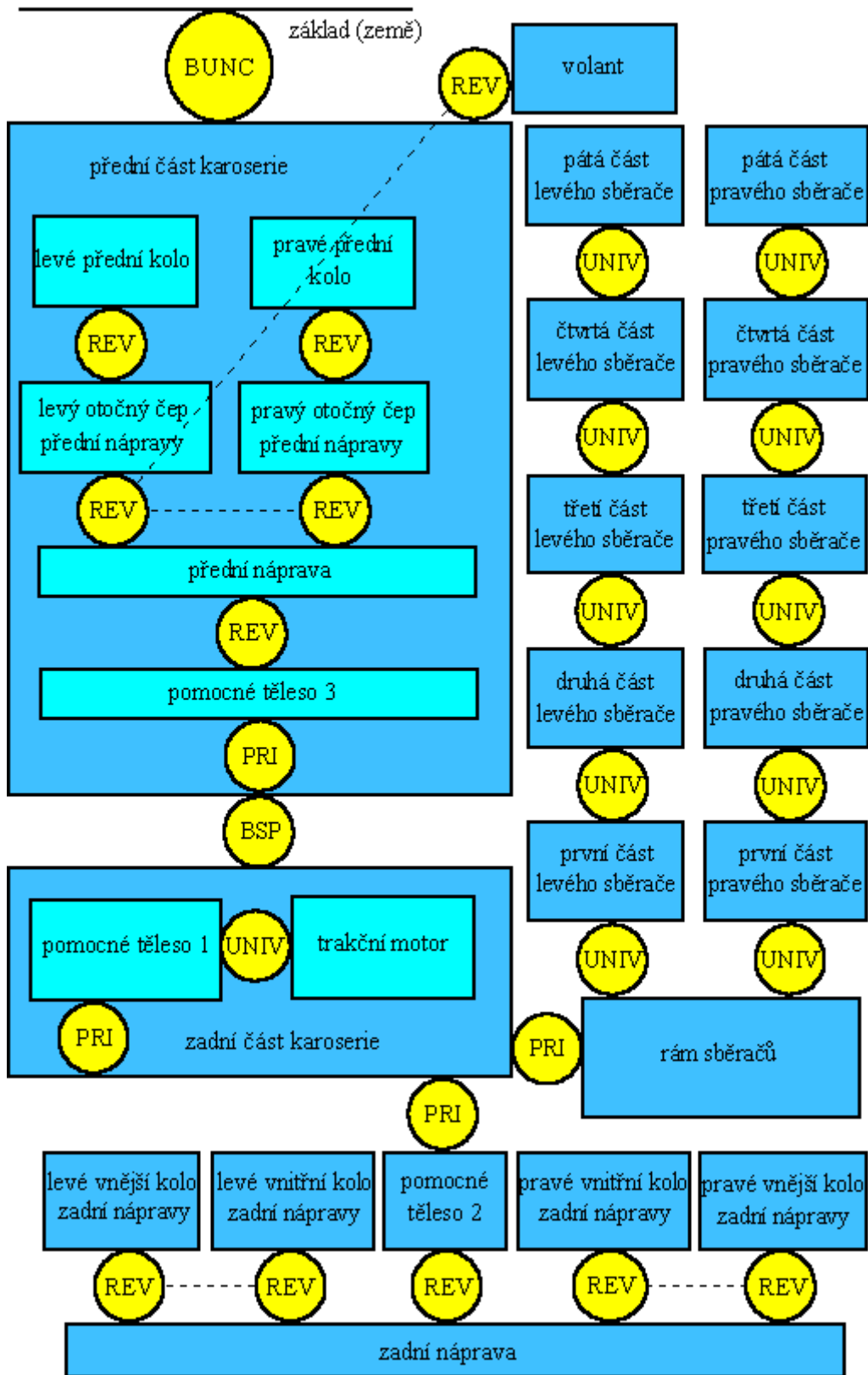
prakticky nemožný. Lze předpokládat, že pád člověka je mnohem komplikovanější dynamický děj než pád tuhého tělesa. Výpočet síly je zapotřebí provést s ohledem na biomechaniku člověka.

Multibody modely

Program **alaska** (**advanced lagrangian solver in kinetic analysis**) [7] je určen pro vyšetřování kinematických veličin a dynamického chování prostorových vázaných mechanických systémů tvořených soustavou těles. Kromě tuhých těles je možné použít i speciální prvek, tzv. „superelement“, který aproximuje dynamické chování pružného nosníku. Program obsahuje moduly, které umožňují modelovat pneumatiku (*Tire Modul*) a kontakt kolo – kolejnice (*Wheel-Rail Modul*). Při simulacích pohybu s multibody modely jsou programem **alaska** sestaveny Lagrangeovou metodou nelineární pohybové rovnice, které jsou řešeny přímou numerickou integrací.

Multibody model trolejbusu ŠKODA 14 Tr M

Multibody model trolejbusu ŠKODA 14 Tr M [2] byl vytvořen na základě technické dokumentace a číselných údajů poskytnutých výrobcem, společností ŠKODA OSTROV s.r.o. Je tvořen 28-mi tuhými tělesy (odpovídají jednotlivým konstrukčním částím trolejbusu nebo se jedná o „pomocná“ tělesa), která jsou navzájem svázána 28-mi kinematickými vazbami. Model má 46 stupňů volnosti. Jednotlivá tělesa jsou definována setrvačnostními vlastnostmi (hmotností, souřadnicemi těžišť a hmotovými momenty setrvačnosti). Vzduchové pružiny, tlumiče a silentbloky jsou modelovány propojením odpovídajících tuhých těles silovými pružně tlumícími prvky. Pneumatiky jsou modelovány s využitím *Tire Modulu*. Kinematické schéma multibody modelu trolejbusu je na obr. 2. Obdélníky označují tuhá tělesa, kruhy označují kinematické vazby (BUNC = volná, REV = rotační, PRI = posuvná, BSP = sférická, UNIV = univerzální). Přerušované čáry spojují vzájemně závislé kinematické vazby.

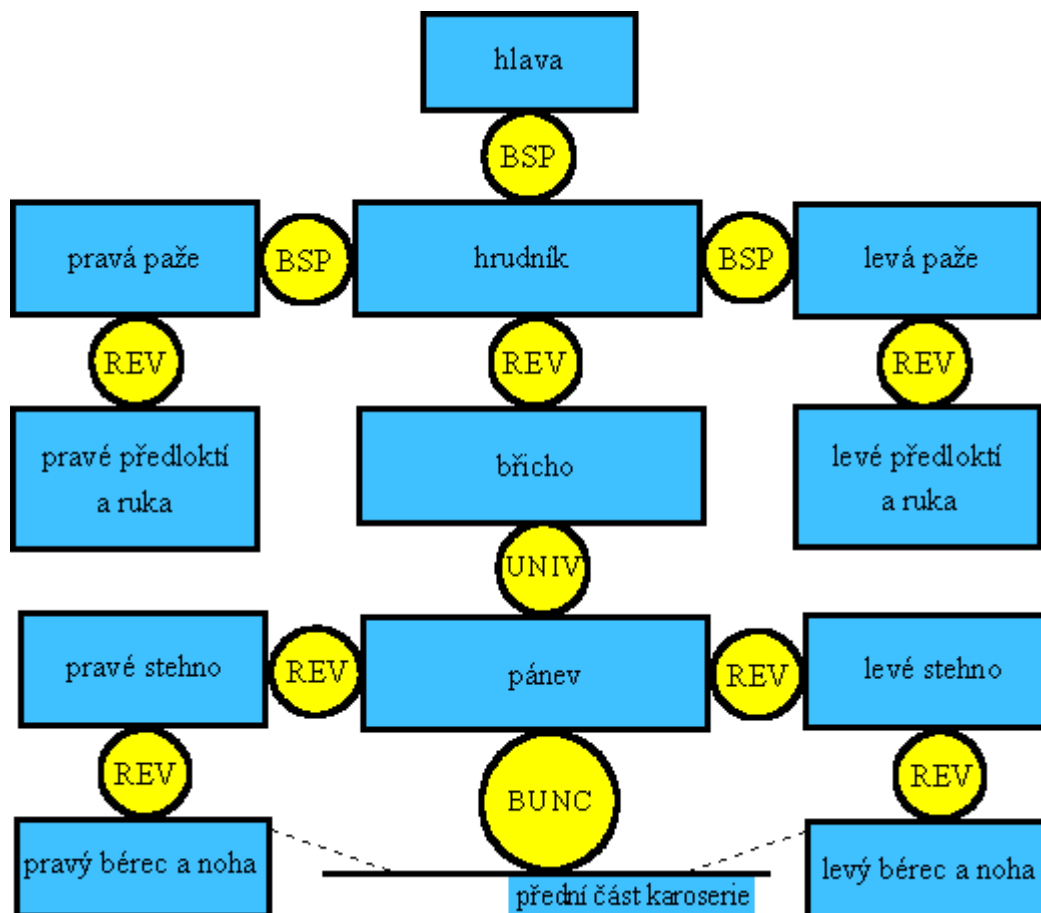


Obr.2 Kinematické schéma multibody modelu trolejbusu

Multibody model člověka

Multibody model člověka je sestaven na základě poznatků převzatých z IfM Chemnitz. Odpovídá zjednodušené anatomii pohybového systému s cílem podchytit základní kinematické a dynamické vlastnosti lidského těla.

Multibody model člověka je tvořen 12-ti tuhými tělesy, která jsou navzájem svázána 12-ti kinematickými vazbami se 24-mi stupni volnosti [3]. Na základě volby „parametrů“ (výšky a hmotnosti člověka) se v modulovém multibody modelu automaticky stanoví geometrické rozměry a setrvačností vlastnosti tuhých těles modelujících jednotlivé části lidského těla (z pohledu kinematiky). Omezení ohybu a zamezení samovolného ohybu v kloubech uvažovaných v multibody modelu člověka je realizováno pomocí silových pružně tlumících prvků. Kinematické schéma multibody modelu člověka je na obr. 3.

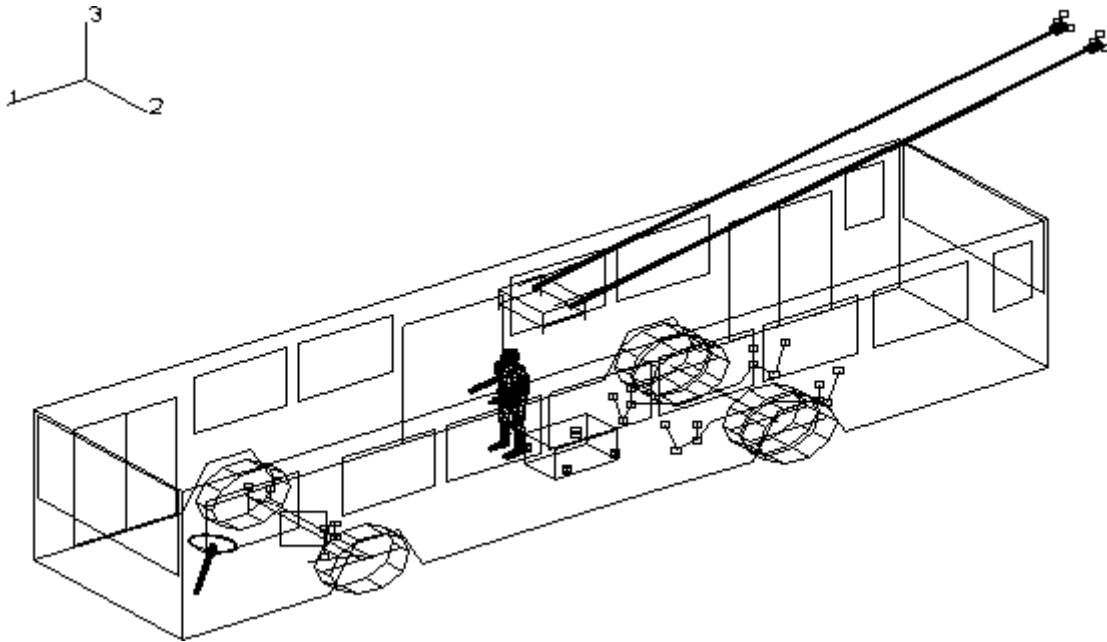


Obr. 3 Kinematické schéma multibody modelu člověka

Multibody model trolejbusu se stojícím cestujícím

Multibody model trolejbusu ŠKODA 14 Tr M se stojícím cestujícím byl vytvořen spojením multibody modelu trolejbusu a multibody modelu člověka (viz obr. 4). Mezi přední částí karoserie trolejbusu a pánví cestujícího je volná kinematická vazba, kontakt chodidel s podlahou trolejbusu je realizován 8-mi silovými pružně tlumícími prvky.

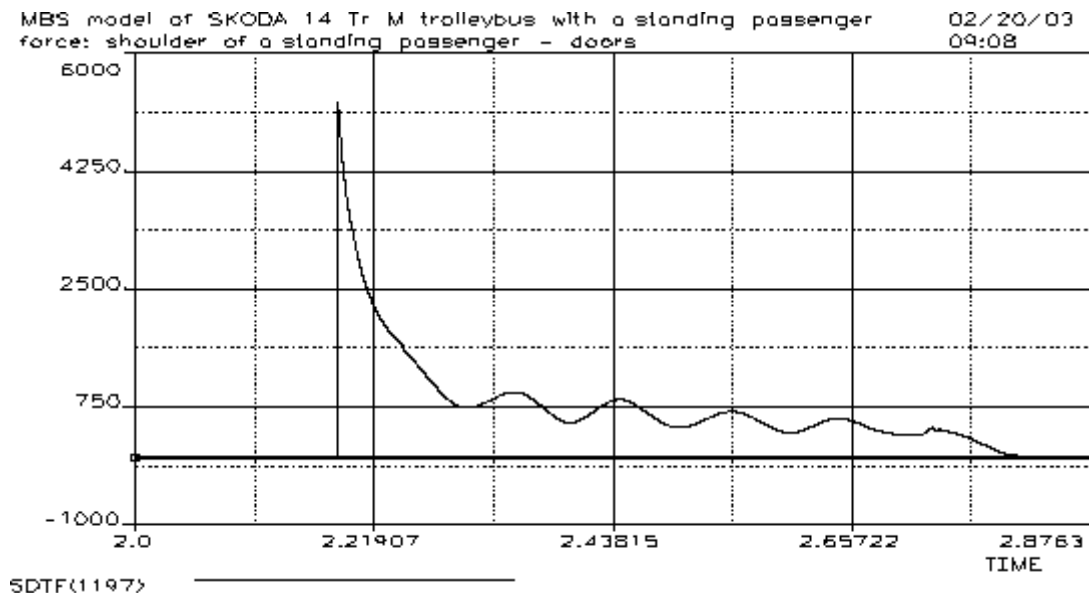
Tuhost kompozitových dveří byla stanovena výpočtem na jejich MKP modelu [4] v programu COSMOS/M [8]. V multibody modelu trolejbusu se stojícím cestujícím je tato vypočtená tuhost realizována silovým pružně tlumícím prvkem, který je aktivní pouze v případě kontaktu cestujícího s dveřmi.



Obr. 4 Multibody model trolejbusu se stojícím cestujícím

Simulace s multibody modelem

Pro určení časového průběhu a extrému síly působící na dveře vyvolané pádem stojícího cestujícího byl s multibody modelem simulován náhlý vyhýbací manévr při různých rychlostech jízdy a při různém úhlu natočení předních kol trolejbusu [5]. Pád byl uvažován na nejméně tuhé místo dveří. Byly měněny i „parametry“ cestujícího: vzdálenost od dveří, hmotnost a výška. Při simulacích nebyla uvažována rychlá reakce člověka (zmírnění následku pádu zachycením dveří rukou, skrčení, apod.), byl uvažován náraz zády nebo ramenem.



Obr. 5 Časový průběh síly při nárazu cestujícího na dveře ramenem

Studijní výpočty vcelku potvrdily očekávané výsledky. Na extrémní velikost rázové síly má značný vliv maximální úhel natočení předních kol při vyhýbacím manévru, rychlost jízdy a hmotnost cestujícího. Vzdálenost stojícího cestujícího od dveří má vliv pouze do určité míry

a vliv jeho výšky je již méně podstatný. Větší síly vznikají při nárazu cestujícího na dveře zády.

Pro výpočet odolnosti plastových dveří proti rázové síle byla zvolena jedna z méně příznivých variant podmínek simulace při nárazu cestujícího na dveře ramenem: maximální úhel natočení předních kol 15° , rychlost jízdy 40 km/h, hmotnost cestujícího 85 kg, vzdálenost od dveří 0.825 m a výška cestujícího 1.8 m. Časový průběh síly působící na dveře je na obr. 5, její extrémní hodnota je 5.3 kN.

Experimentální zkouška

Jednou ze zkoušek plastových dveří pro trolejbusy ŠKODA 14/15 Tr vyrobených z kompozitového materiálu byla zkouška pevnosti a bezpečnosti proti vypadnutí z vodícího mechanismu [6].

Měřený objekt

Měřeno bylo pravé křídlo plastových dveří v provedení pro střední nebo zadní nástupní prostor trolejbusů ŠKODA 14/15 Tr. Veškeré kovové části dveří odpovídaly navrhovanému konstrukčnímu řešení pro sériovou výrobu, okno bylo přilepeno, spodní část dveří vyplněna kompozitovou deskou. Dveře, na nichž se zkouška prováděla, neměly šikmé madlo přes okno.

Metodika zkoušení

Po dohodě se zákazníkem bylo zvoleno zatěžování dveří statickou silou při současném měření jejich průhybu v místě působení síly.

Požadavky zákazníka, předpokládané podmínky měření:

- dveře budou namáhány tlakovou silou z vnitřku trolejbusu směrem ven, tj. jak mohou být zatěžovány v provozu,
- upevnění dveří je dáno jejich konstrukcí, tj. s plnou výzbrojí armatur včetně otevíracího mechanismu, kluzátka na horní konzole vedení dveří a zarážky na spodní konzole vedení dveří.

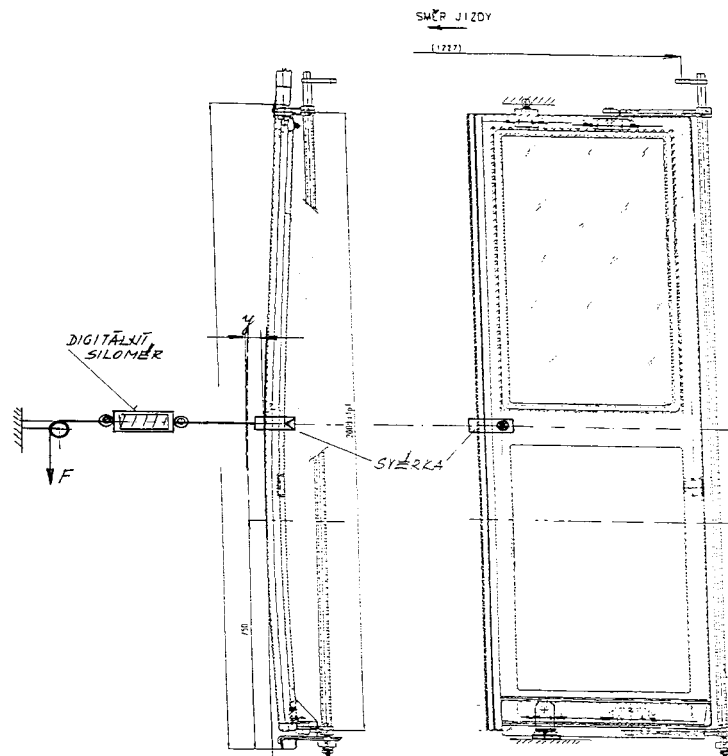
Měření

Měření se uskutečnilo za spolupráce Městského dopravního podniku města Plzně na točně depa. Vzhledem k malému manévrovacímu prostoru s kloubovým trolejbusem ŠKODA 15 Tr bylo nutné dveře zkoušet v místě předního vstupu (rozteč všech dveří je stejná). Schéma zatěžování a měření je na obr. 6.

Použité přístroje:

- digitální siloměr TR-P 1-500 kN,
- hřebenový zvedák,
- milimetrové měřítko.

Zatěžování dveří tlakovou silou z vnitřku trolejbusu bylo nahrazeno „tažením“ dveří proti ocelovému sloupu trolejového vedení. Zatížení dveří bylo stupňovitě zvětšováno až do maximální síly, při které se dveře poškodily a vypadly z držáků. Zaznamenávány byly okamžité hodnoty síly F [kN] a průhybu x [mm] (viz tab. 1 a obr. 7).



Obr. 6 Schéma zatěžování a měření

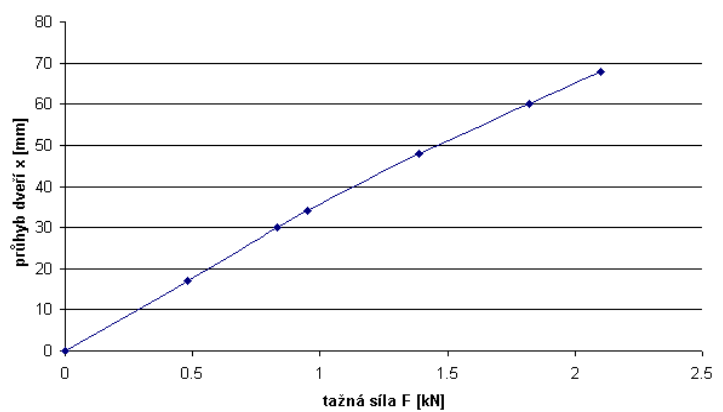
Naměřené hodnoty

Z naměřených hodnot bylo patrné, že kritická síla pro měřený objekt je 2.1 kN. Při této síle došlo k vytržení zarážky na spodní konzole vedení dveří za současného vypadnutí kluzátka z drážky na horní konzole vedení dveří.

Síla F [kN]	Průhyb x [mm]
0	0
0.48	17
0.83	30
0.95	34
1.39	48
1.82	60
2.1	68

Tab. 1 Naměřené hodnoty

Zkouška dveří proti vypadnutí



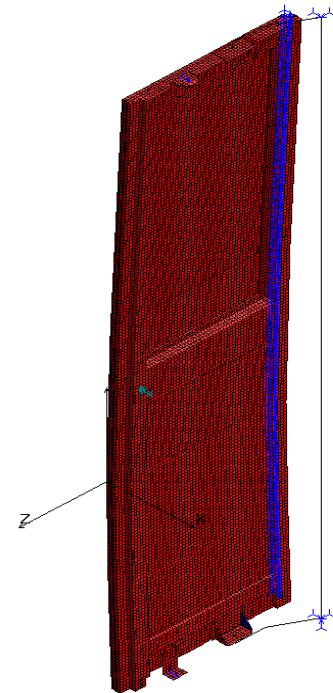
Obr. 7 Graf závislosti tažné síly F na průhybu x

MKP výpočty

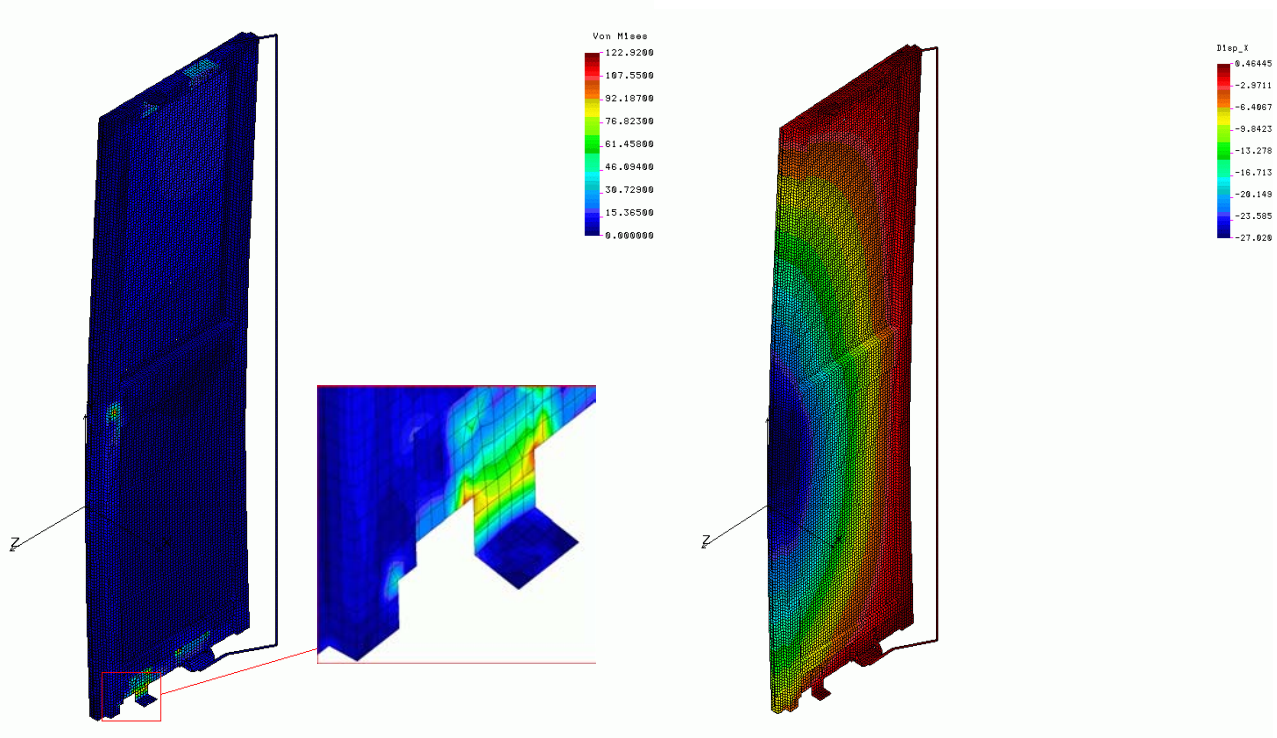
MKP model pravého křídla plastových dveří (levé křídlo je osově symetrické) je vytvořen z 25800 skořepinových (vlastní dveře) a nosíkových prvků (vodící tyče dveří) v programu COSMOS/M (viz obr. 8). Požadované materiálové vlastnosti plastu pro tvorbu MKP modelu byly zjištěny zkouškami na vzorcích v Mechanické akreditované zkušebně ŠKODA VÝZKUM s.r.o. [4], pro definování materiálových vlastností skla byl použit materiál *Glass* z knihovny programu COSMOS/M. Okrajové podmínky odpovídají uchycení dveří k rámu karoserie trolejbusu a „uzamčení“ dveří během jízdy.

Napětí a posuvy plastových dveří byly počítány pro kombinaci dvou zatěžovacích stavů: působení sil od zavíracího mechanismu (síly byly zadány na základě kinematického schématu mechanismu dodaného výrobcem) a působení síly od opření se cestujícího o dveře (její působíště je uvažováno v nejméně tuhém místě dveří – viz obr. 8).

Při výpočtu bylo uvažováno, že cestující se o dveře opírá silou o velikosti 1 kN. Při této síle bylo vypočteno maximální von Misesovo napětí 123 Mpa v oblasti spodní konzoly vedení dveří (obr. 9 - detail). V místě působíště síly bylo vypočteno von Misesovo napětí 94 MPa (obr. 9) a průhyb 26.8 mm (obr. 10).



Obr. 8 MKP model dveří



Obr. 9 Rozložení von Misesova napětí

Obr. 10 Průhyb dveří

Vypočtené hodnoty průhybu dveří od statické síly působící ve stejném místě jako při experimentálním měření pevnosti dveří jsou v tab. 2.

Síla F [kN]	Průhyb x [mm]
1	27
2.1	57
2.5	68

Tab. 2 Vypočtené hodnoty

Při experimentálním měření došlo při průhybu dveří 68 mm k vytržení zarážky na spodní konzole vedení dveří za současného vypadnutí kluzátka z drážky na horní konzole vedení dveří při působení statické síly o velikosti 2.1 kN. Při MKP výpočtu dojde ke stejnému průhybu dveří při působení síly o velikosti 2.5 kN.

Závěr

S využitím multibody simulací byl při náhlém vyhýbacím manévru stanoven extrém síly vyvolané pádem stojícího cestujícího na plastové dveře trolejbusu ŠKODA 14 Tr M. Konstrukce dveří musí být odolná minimálně proti rázové síle této velikosti. Výsledky jedné z méně příznivých podmínek simulace sloužily jako vstupní data pro MKP výpočet namáhání plastových dveří v programu COSMOS/M a jako podklady pro experimentální zkoušky na jejich reálném prototypu.

Při experimentální zkoušce i MKP výpočtu byl sledován průhyb plastových dveří (do doby vypadnutí dveří z rámu karoserie trolejbusu) při působení statické síly v nejméně tuhém místě dveří. Výsledky experimentálního měření a MKP výpočtu vykazují dobrou shodu.

Literatura

- [1] Kepka, M. - Hejman, M. - Polach, P - Václavík, J.: *Using the Computer Simulations at Trolleybus Development: Strength, Dynamic and Fatigue* – CD-ROM Proceedings of the European Conference on Computational Mechanics '99, Munich, Book of Abstracts pp. 902-903, 1999, 14 p.
- [2] Polach, P.: *Verifikované multibody modely trolejbusu ŠKODA 14 Tr M* – výzkumná zpráva ŠKODA VÝZKUM s.r.o. VYZ 0517/2001, Plzeň, 2001, 55 str.
- [3] Polach, P.: *Jednoduchý parametrický multibody model člověka* – sborník 18. konference s mezinárodní účastí Výpočtová mechanika 2002, Nečtiny, II.díl, str. 371-378, 2002
- [4] Kindelmann, P.: *Výpočty namáhání plastových dveří trolejbusu ŠKODA 14/15 Tr* – výzkumná zpráva ŠKODA VÝZKUM s.r.o. VYZ 0506/2001, Plzeň, 2001, 49 str.
- [5] Polach, P.: *Simulation of the Fall of a Standing Passenger against the Composite Doors of the ŠKODA 14 Tr M Trolleybus during an Unexpected Avoidance Manoeuvre* – CD-ROM Proceedings of the National Conference with International Participation Engineering Mechanics 2003, Svatka, 2003, 10 p.
- [6] Bártík, J.: *Kompozitové dveře pro TR 14/15 - pevnost dveří a bezpečnost proti vypadnutí z vodičího mechanismu* – zkušební protokol č. 712/2001, Plzeň, 2001, 9 str.
- [7] *alaska, User Manual, Version 2.3* – Institute of Mechatronics, Chemnitz, 1996
- [8] *COSMOS/M, Finite Element Analysis System, User Guide, Version 2.5* – SRAC, Los Angeles, 1999