

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice PhD Thesis, sv. 434

ISSN 1213-4198



Ing. Jan Šplíchal

**Analýza a výpočet deformace letounu
při havarijním přistání
s využitím systému MKP
pro velké deformace MSC.Dytran**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
LETECKÝ ÚSTAV

Ing. JAN ŠPLÍCHAL

**Analýza a výpočet deformace letounu při havarijním
přistání s využitím systému MKP pro velké
deformace MSC.Dytran**

AIRCRAFT CRASHWORTHINESS AND DEFORMATION ANALYSIS USING FEM
APLICATION MSC.DYTRAN

ZKRÁCENÁ VERZE PH.D. THESIS

Obor: Konstrukční a procesní inženýrství
Školitel: Doc. Ing. Miroslav Vondrák, CSc.
Oponenti: Prof. Ing. Antonín Píštěk, CSc.
Doc. Ing. Miroslav Petrásek, CSc.
Datum obhajoby: 23. 8. 2007

KLÍČOVÁ SLOVA

Pasivní bezpečnost, deformační zóna, letadlová technika, bezpečnost kokpitu, velké deformace, certifikace letounu, figurína, JAR, FAR, CS, OSTIV

KEYWORDS

Passive safety, Deformation zone, Aircraft, Crashworthiness, Large deformation, Aircraft certification, Dummy, JAR, FAR, CS, OSTIV

Disertační práce je uložena na oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně, Technická 2, 616 69 Brno

OBSAH

OBSAH	3
1 ÚVOD	5
2 STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY A STANOVENÍ CÍLŮ DISERTAČNÍ PRÁCE.....	6
3 STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY V OBLASTI KLUZÁKŮ	7
4 VÝPOČTOVÝ SYSTÉM.....	8
5 MOŽNOSTI ŘEŠIČE MSC.DYTRAN.....	8
6 FIGURÍNA.....	9
7 VÝPOČET SEDAČEK	10
8 VÝPOČET KLUZÁKU	15
9 ZKOUŠKA TRUPU DLE PŘEDPISU CS 22	18
10 ZÁVĚR.....	20
POUŽITÉ ZKRATKY	21
LITERATURA.....	22
CIRRICULUM VITAE	23
PUBLIKACE AUTORA.....	25
ABSTRACT	27

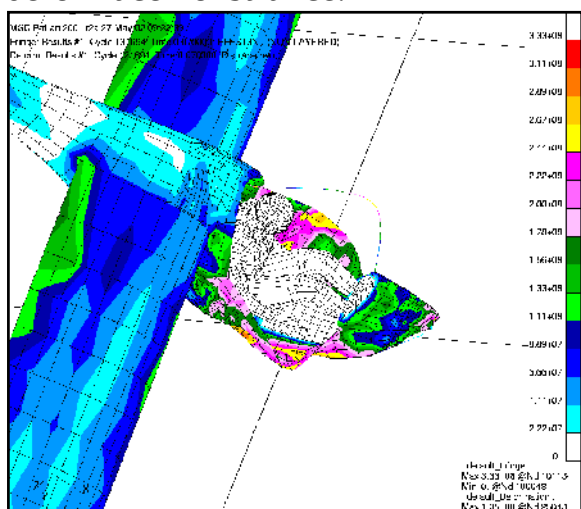
1 ÚVOD

V souvislosti se současným růstem počtu provozovaných a vyvíjených letadel spadajících do kategorií CS 22 dříve JAR 22 a CS 23, FAR 23 dříve JAR/FAR 23 a se zvyšujícími se nároky na jejich certifikaci a bezpečnost je spojen i růst požadavků na zvyšování pasivní bezpečnosti kokpitu letadel na straně jedné. Na druhé straně, ze strany výrobců jsou naopak kladeny důrazné požadavky na minimalizaci nákladů spojených s vývojem a certifikací letadel těchto kategorií. S tím souvisí i procesy spojené s ověřováním pasivní bezpečnosti.

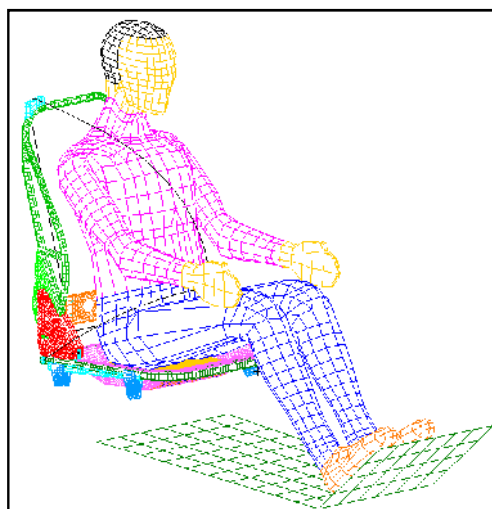
Do této kategorie certifikačních zkoušek spadají zejména případy zatížení leteckých konstrukcí, jako jsou sedačky, poutacích pásy, přední části letadel atd. Zatížení pro tyto části jsou předepsány a definovány v leteckých předpisech (CS dříve JAR/FAR) a doporučeních (OSTIV SDP). Tyto předpisy udávají zatížení, při kterém musí konstrukce dostatečně ochránit osoby na palubě, přičemž může dojít k velkým deformacím nebo k porušení konstrukce letadel

V současné době jsou průkazy pasivní bezpečnosti do značné míry vedeny pomocí náročných, nákladných zkoušek a testů prováděných na zkušebních stendech. Tento proces je časově ale i finančně velmi náročný a to nejen z důvodu naprostého zničení zkušebního vzorku (trupu, části kokpitu, sedačky,...) a tím znemožnění opakovat zkoušku na stejném, nebo opraveném vzorku. Velká náročnost je dána i nutností používání náročné a nákladné měřicí techniky a přípravků.

Východiskem z těchto problémů je využití metody konečných prvků (MKP) pro analýzy a simulace těchto případů zatížení konstrukce. Tyto MKP analýzy a simulace vedou ke snížení počtu zkoušek nebo k jejich částečnému či úplnému nahrazení. Výpočtové softwary pro tyto analýzy a simulace však musí umožňovat simulace v oblasti dynamického zatěžování konstrukce letadel. Průběh simulace zahrnuje časový úsek v řádu desetin sekundy, během něhož jsou dosaženy velké deformace konstrukce.



Obrázek 1 - MKP model kluzáku s Dummy figurínou



Obrázek 2 - MKP výpočtový model sedačky

2 STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY A STANOVENÍ CÍLŮ DISERTAČNÍ PRÁCE

Na leteckém ústavu FSI VUT Brno je věnována velká pozornost provádění simulací a analýz pomocí MKP. Tyto analýzy a simulace jsou jak statického, tak i kvazistatického a dynamického charakteru. Pro možnost provádět dynamické analýzy a simulace bylo nutné doplnit softwarové vybavení o MKP řešič schopný řešit tyto náročné problémy. Jedná se o software MSC.Dytran.

V rámci spolupráce leteckého ústavu s průmyslem měl autor možnost řešit některé problémy související s MKP analýzami a simulacemi v oblasti statického a dynamického zatěžování leteckých konstrukcí. V oblasti dynamických analýz a simulací se jedná především o řešení problematiky odolnosti přední části kluzáku při havarijních případech zatížení a pasivní bezpečnosti pilotních sedaček a bezpečnostních pasů. Simulace odolnosti přední části kluzáku dle předpisu SC 22 a doporučení OSTIV SDP byly prováděny na trupech kluzáků TST 10 a GS 304 CZ. Dále pak byly prováděny simulace v oblasti pasivní bezpečnosti pilotních sedaček dle předpisu CS 23. Tyto byly prováděny na pilotní sedačce letounu VUT100.

Hlavním cílem disertační práce je vypracování postupů, metodik a doporučení pro řešení nastíněné problematiky v oblasti dynamických analýz a simulací pomocí MKP. Dále pak verifikace MKP modelů s provedenými dynamickými zkouškami. Pro dosažení tohoto hlavního cíle bylo nutno řešit následující dílčí problémy:

➤ **Řešení problematiky odolnosti přední části trupu kluzáku:**

- Provedení MKP simulací pro zatížení odpovídající zatížení dle předpisu CS22.562
- Provedení MKP simulací a analýz pro zatížení odpovídající doporučení OSTIV SDP
- Provedení zkoušky přední části trupu kluzáku pro zatížení odpovídající předpisu SC 22.562

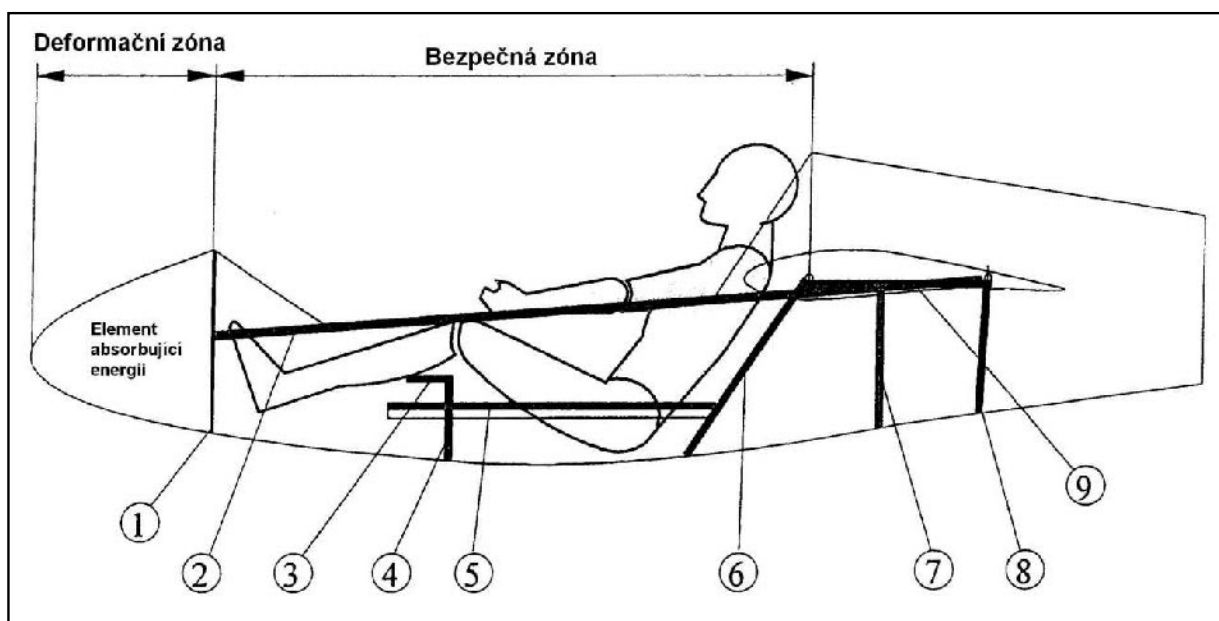
➤ **Řešení pasivní bezpečnosti pilotních sedaček a bezpečnostních pasů:**

Vytvoření postupů a metodiky pro práci s MKP modelem DUMM figuríny v prostředí preprocesoru MSC.Patran pro analýzy prováděné v řešiči MSC.Dytran. Provedení MKP simulací pro zatížení odpovídající zatížení dle předpisu CS23.562. Vytvoření postupů a metodiky pro vyhodnocování zatížení působící na figurínu v průběhu simulace.

3 STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY V OBLASTI KLUZÁKŮ

Řešení problematiky pasivní bezpečnosti kluzáku je aktuální technický problém posledních 20 let. Vedoucí místo v realizaci provedeno výzkumu a v uskutečněných inovacích zaujímá Německo, které je zároveň světovým lídrem v jejich produkci.

V současné době je tendence navrhovat kabiny kluzáku podobně jako kokpity závodních automobilů Formule 1 s využitím zejména kompozitních materiálů. Na konci devadesátých let byl v tomto duchu vytvořen návrhový koncept konstrukce bezpečné kabiny. Jedná se o výčet nezbytných konstrukčních prvků, které by měli zabezpečit nezbytnou ochranu pilota při havarijních případech zatížení. Schematický návrh takovéto kabiny je na obrázku 3.



Obrázek 3 - Koncept bezpečného kokpitu

Jednotlivé konstrukční prvky, které by měl kokpit obsahovat jsou:

1. přední přepážka
2. vyztužený rám kabiny
3. příčná výztuha
4. přepážka
5. vyztužené závěsy upnutí sedačky
6. přepážka + příčná trubková výztuha závěsů
7. kruhová přepážka
8. přepážka + příčná trubková výztuha závěsů
9. horní stěna podvozkové šachty

4 VÝPOČTOVÝ SYSTÉM

Jako řešič pro tyto analýzy a simulace metodou konečných prvků, umožňující řešit úlohy zahrnující velké deformace a velké rychlosti těchto deformací byl využit systém MSC.Dytran (řešič). MSC.Dytran vznikl v roce 1991 sloučením programů MSC.Dyna (metoda konečných prvků) a MSC.Pisces (metoda konečných objemů).

Jedná se o systém určený pro simulaci vysokorychlostní odezvy těles, struktur a plynů. Umožňuje řešit rozsáhlé praktické problémy v mnoha rozličných technických odvětvích. Systém MSC.Dytran je navržen k použití při simulacích a analýzách týkajících se krátkodobých případů zatížení s extrémními deformacemi materiálů, interakcí plynu a struktur. Typické aplikace jsou např. iniciace airbagu a interakce posádky, náraz ptáka do letounu, exploze v přepravním kontejneru uvnitř letadla a mnohé další.

MSC.Dytran umožňuje dva přístupy k řešení. Pro metodu konečných prvků je to Lagrangeův a pro metodu konečných objemů je to Eulerův postup řešení.

Při použití Lagrangeova postupu řešení výpočetní síť jsou uzly umístěny na tělese. Spojením uzlových bodů vzniká prvek, který nahrazuje reálné těleso. Samotná síť je vytvořena seskupením jednotlivých elementů. Při zatížení tělesa se začínají přemísťovat uzly a zároveň se deformují samotné elementy. Lagrangeův postup řešení počítá s přemístěním elementů a jejich deformaci při konstantní hmotě.

Naproti tomu Eulerův postup řešení výpočetní síť uzly fixuje v prostoru a prvky jsou odděleny od prostoru definovaného spojením uzlů. Materiál tělesa se při analýze pohybuje Eulerovou sítí a hmotnost, momenty a energie materiálu je přemísťována z elementu do elementu.

Základní pohybová rovnice:

$$[M]\{\ddot{a}\}_n + [C]\{\dot{v}\}_n + [K]\{d\}_n = \{F\}_n^{ext} \quad (1)$$

5 MOŽNOSTI ŘEŠIČE MSC.DYTRAN

MSC.Dytran je systém pro řešení 3D úloh v oblasti analýzy dynamického nelineárního chování konstrukcí a kapalin. Používá explicitní kód (přímá integrace v čase) a obsahuje kapacity pro simulaci širokého spektra úloh s materiálovými a geometrickými nelinearitami.

Je obzvláště výhodný pro řešení rychlých dějů, které obsahují velké deformace, vysoký stupeň nelinearit a interakci mezi pevnou strukturou a kapalinami.

K dispozici je Lagrangeovský a Eulerovský řešič, které umožňují modelovat jak pevné struktury, tak kapaliny. Síť prvků pro tyto řešiče mohou být řešeny společně a tím je možné analyzovat interakci mezi kapalinou a pevnou strukturou. (ALE-coupling)

Obsažené materiálové modely dovolují definovat materiály s vlastnostmi popisujícími lineární chování, kriteria meze kluzu, modely poškození, stavové rovnice, výbušný materiál s hořením atd. Specifické materiálové modely mohou být také použity při definici elastoplastických, ortotropních kompozitních materiálů.

Časově proměnné zatížení může být aplikováno na Lagrangeovské prvky jako koncentrované síly, tlakové zatížení nebo nepřímo jako předdefinovaná deformace nebo počáteční podmínky. Zatížení do Eulerovské části modelu se aplikuje prostřednictvím tlaku, definičních podmínek na hraničních plochách nebo počátečních podmínek.

Pomocí definice kontaktních ploch lze řešit interakci Lagrangeovské struktury mezi sebou nebo její interakci s tuhou geometrií. Tato interakce může obsahovat kontakt, tření a efekty separace.

6 FIGURÍNA

Pro stanovení zatížení působícího na posádku a cestující je při řešení těchto simulací a analýzách metodou konečných prvků využívána ATB – figurína. Figurína je generována pomocí programu „GEBOD verzion V“ který je obsažen v systému MSC.Dytran. Pomocí programu GEBOD je možné generovat vstupní soubor pro využívání ATB – figuríny. Jedná se o figuríny:

- **HYBRID II 50%** jedná se o MKP model druhé generace testovacích figurín, které reprezentuje svými antropometrickými vlastnostmi 50% populace
- **HYBRID III 50%** jedná se o MKP model třetí generace testovacích figurín, které reprezentuje svými antropometrickými vlastnostmi 50% populace

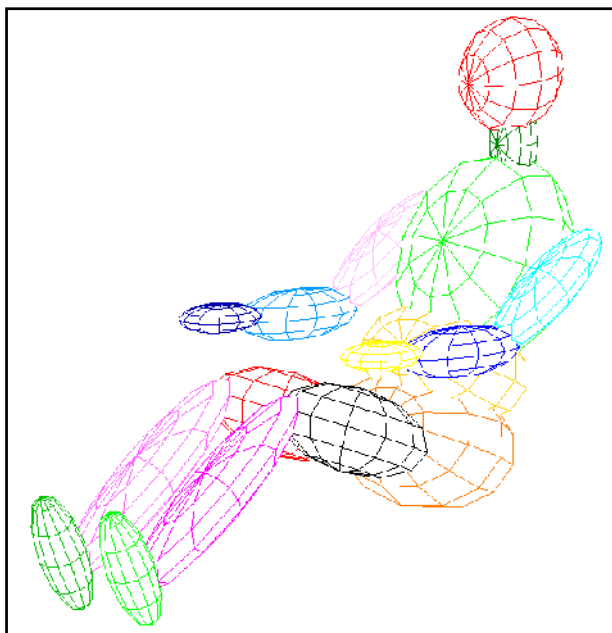
Při prováděných simulacích byla využívána ATB – figurína HYBRID III 50% umožňující sledování rychlostí a zrychlení v jednotlivých bodech figuríny.

Pro využití figuríny při simulacích a analýzách se figurína skládá ze dvou částí:

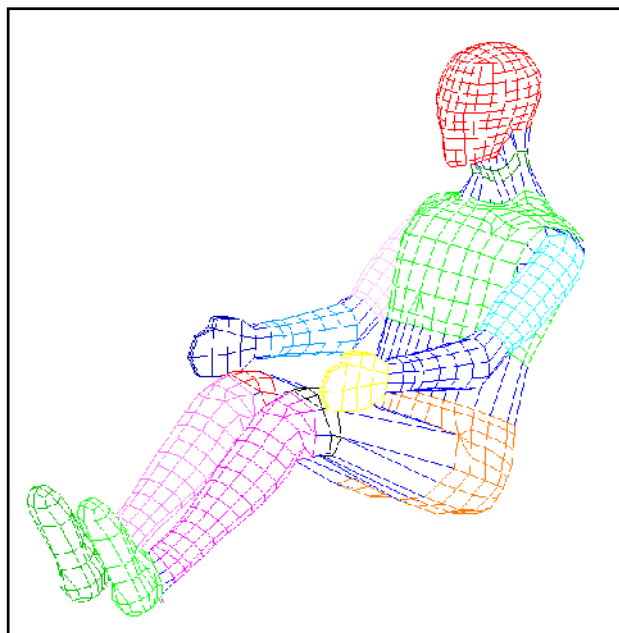
- první část je složena ze 17 rigid elipsoidů viz obrázek 4. Tyto elipsoidy jsou pomocí funkcí nahrazující klouby svázány tak aby zajišťovaly chování (pohyby) figuríny a jsou řízeny daty ze vstupního *.ain souboru.
- druhá část figuríny je tvořen 2D elementy viz obrázek 5. Tato část tvoří potah figuríny, který slouží k zprostředkování kontaktu figuríny s okolní konstrukcí a bezpečnostními pásy.

Obě tyto části jsou pak navzájem matematicky propojeny pro zajištění vzájemné interakce obou částí.

Jak již bylo naznačeno, figurína je definována pomocí jednotlivých elipsoidů, které jsou propojeny jednotlivými spoji.



Obrázek 4 – Elipsoidy figuríny

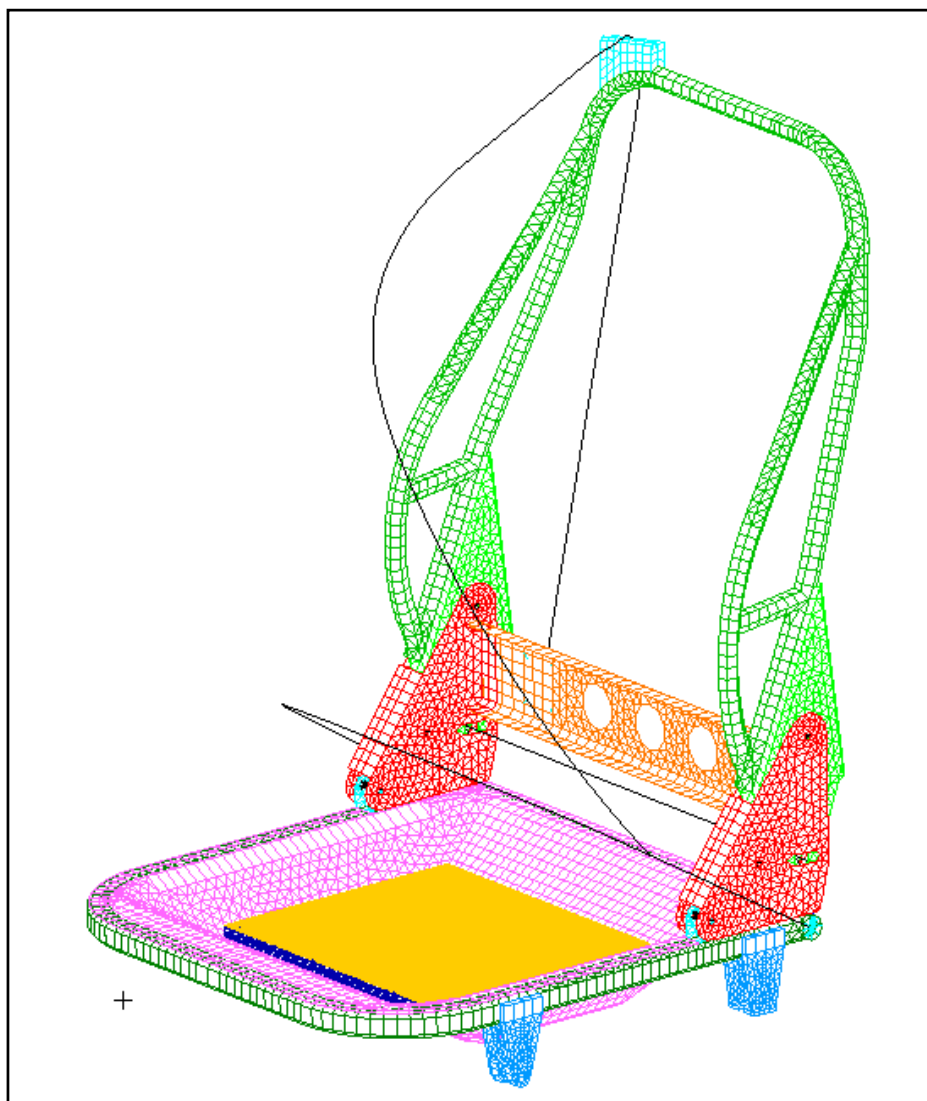


Obrázek 5 – Potah figuríny

7 VÝPOČET SEDAČEK

Pro sedačky a bezpečnostní pásy malých sportovních letadel jsou leteckými předpisy stanoveny dva případy zatížení, které definují působící zpomalení (decelerace), dobou po kterou to zpomalení působí a směr kterým působí. V průběhu tohoto zatěžování jsou sledovány síly v bezpečnostních pásech a zrychlení působící ve vybraných místech na těle pilota, nebo členů posádky. Dále předpis definuje hodnoty těchto sil a zrychlení, které nesmí být překročeny.

Geometrie byla přenesena do systému MSC.Patran pomocí formátu parasolid. Celková sestava byla tvořena jednotlivými konstrukčními díly sedačky. Toto díly byly modelovány jako 3D tělesa. V systému MSC.Patran bylo nutné nejprve tenkostěnné díly převést na střednicové plochy a dále je upravit pro následné vytvoření MKP sítě. Zbylé díly bylo nutno upravit pro vytvoření 3D MKP sítě a to tak že byly odstraněny zaoblení, sražení a odstraněny technologické otvory nepodstatné pro pevnost dílu. MKP model sedačky je zobrazena na obrázku 6.



Obrázek 6 – MKP model sedačky

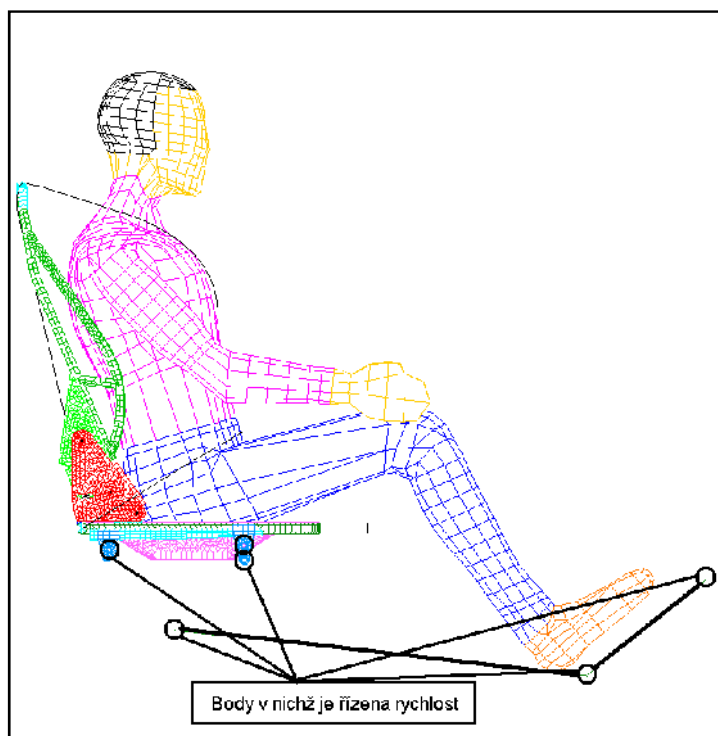
7.1 APLIKOVANÉ ZATÍŽENÍ PRO JAR 23.562 b(1)

Pro případ dle předpisu JAR 23.562 b(1) bylo zatížení aplikováno jako změna rychlosti. Na počátku měl celý MKP model (sedačka + figurína) počáteční rychlost $v = 9,4 \text{ [ms}^{-1}\text{]}$ ze které byl brzděn. Tato počáteční rychlost byla modelu zadána pomocí karty **TICGP**. Aplikované zpomalení mělo průběh odpovídající požadavku předpisu. V průběhu zatěžování musí zpomalení dosáhnout maximální hodnoty 19g a to nejpozději 0,05 [s] po začátku. Průběh rychlosti, zpomalení a zpomalení v násobcích g jsou uvedeny v tabulka 1 a graf 1.

Řízení rychlosti bylo zavedeno v místech uchycení sedačky. To je v místě styku kolejnice, po níž se může sedačka nastavovat a závěsů sedačky. Dále pak po celém obvodu podlahy viz obrázek 7.

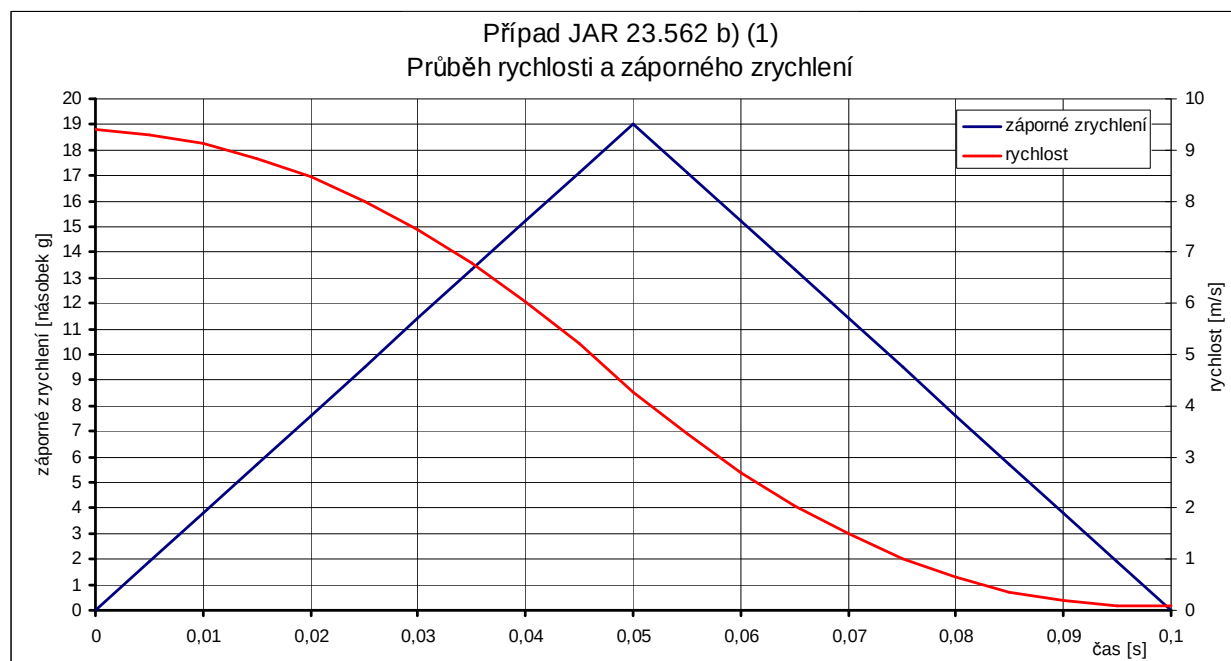
Tabulka průběhu řízené rychlosti:

PŘÍPAD JAR 23.562 b) (1)			
t	násobek	a	v
[s]	[-]	[ms ⁻²]	[ms ⁻¹]
0	0	0	9,4
0,005	1,9	18,632	9,307
0,01	3,8	37,265	9,121
0,015	5,7	55,897	8,841
0,02	7,6	74,53	8,468
0,025	9,5	93,162	8,003
0,03	11,4	111,79	7,444
0,035	13,3	130,43	6,791
0,04	15,2	149,06	6,046
0,045	17,1	167,69	5,208
0,05	19	186,32	4,276
0,055	17,1	167,69	3,438
0,06	15,2	149,06	2,692
0,065	13,3	130,43	2,04
0,07	11,4	111,79	1,481
0,075	9,5	93,162	1,015
0,08	7,6	74,53	0,643
0,085	5,7	55,897	0,363
0,09	3,8	37,265	0,177
0,095	1,9	18,632	0,084
0,1	0	0	0,084



Obrázek 7 – Schéma MKP simulace

Tabulka 1



Graf 1 – Průběh zrychlení a rychlosti během simulace

7.2 VÝSLEDKY SIMULACE SEDAČKY

V průběhu simulace byly sledovány průběhy zrychlení a rychlostí v jednotlivých segmentech figuríny. Tyto průběhy zachycují průběh násobku gravitačního zrychlení v průběhu simulace. Směry jednotlivých složek odpovídají souřadnému systému znázorněnému na obrázku 8.

Pro splnění požadavku předpisu CS 23.562 b(1) je nutné stanovit zatížení působící mezi pánví a páteří. Jelikož použitý MKP model figuríny neumožňuje přímé sledování zatížení mezi pánví a páteří je nutné toto stanovit následně:

Zatížení působící mezi pánví a páteří bylo stanoveno jako součet zatížení působící na jednotlivé segmenty horní části těla figuríny:

$$celkové_zatížení = \sum (m_{část_figuríny} n_{části_figuríny})_z \quad (2)$$

$m_{části\ figuríny}$ hmotnost příslušného segmentu
 $n_{části\ figuríny}$ násobek gravitačního zrychlení působící na daný segment figuríny
 z složka do směru osy z (směr páteře figuríny)

$$celkové_zatížení = (m_{MT} n_{MT} + m_{UT} n_{UT} + m_N n_N + m_H n_H + \\ + m_{RUA} n_{RUA} + m_{LUA} n_{LUA} + m_{RLA} n_{RLA} + m_{LLA} n_{LLA})_z \quad (3)$$

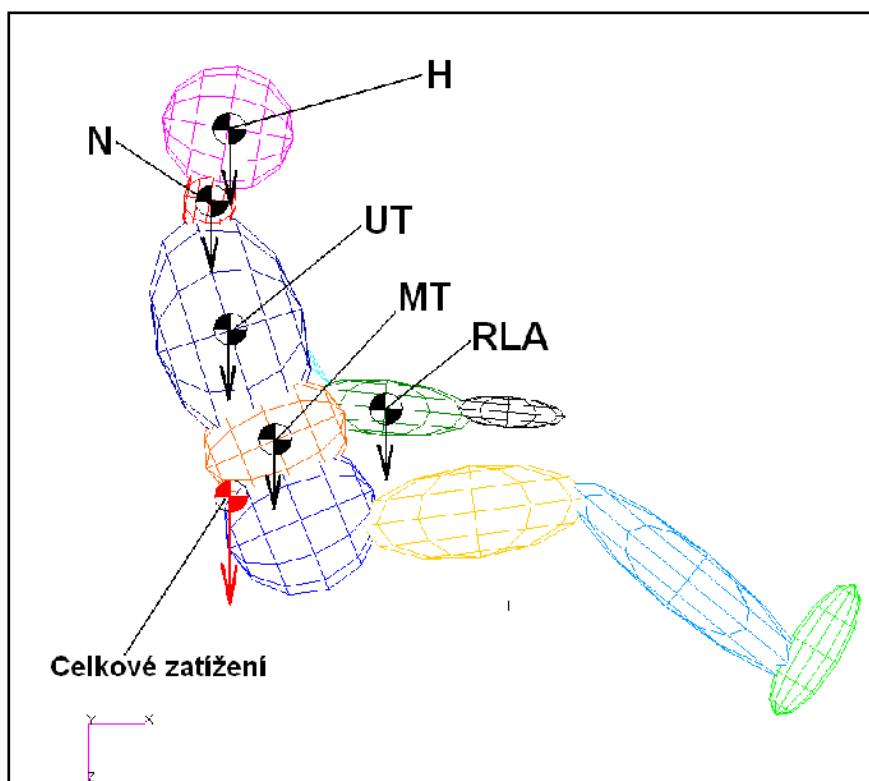
Přehled hmotností jednotlivých segmentů vstupujících do výpočtu zatížení působící mezi pánví a páteří.

Hmotnost jednotlivých segmentů horní části trupu figuríny

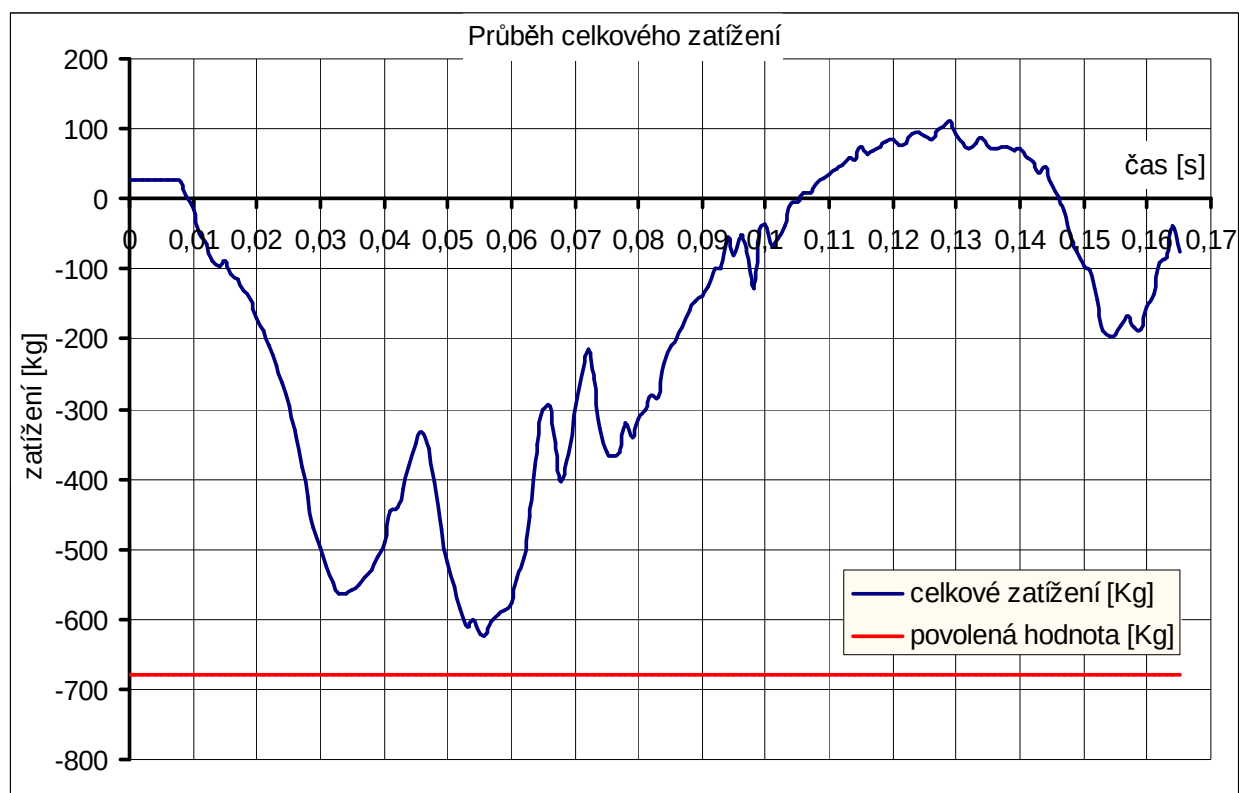
Segment			Hmotnost [kg]
LT	Lower torso	spodní torzo	14,363
MT	Middle torso	střední torzo	3,999
UT	Upper torso	horní torzo	14,284
N	Neck	krk	2,929
H	Head	hlava	3,094
LUA	Left upper arm	levá horní paže	3,157
RUA	Right upper arm	pravá horní paže	3,157
LLA	Left lower arm	levá dolní paže	3,417
LLA	Left lower arm	levá dolní paže	3,417
celkem			51,817

Tabulka 2

Průběh celkového zatížení mezi páteří a pánví zobrazuje graf 2. Tento průběh by stanoven na základě rovnice 3, tabulky 2 a průběhů násobku gravitačního zrychlení v jednotlivých segmentech figuríny.



Obrázek 8 – Zatížení horní části figuríny



Graf 2 – Průběh celkového zatížení mezi pánví a páteří

8 VÝPOČET KLUZÁKU

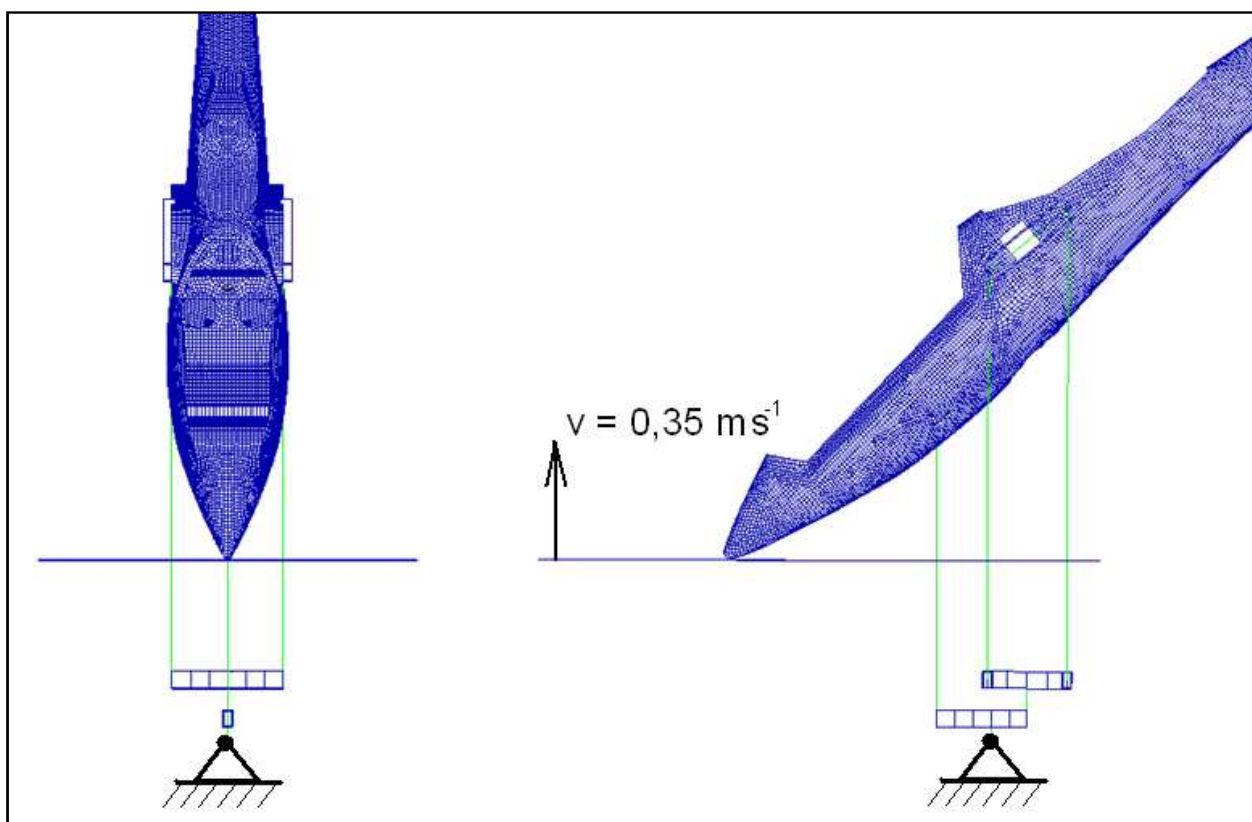
Pro kluzáky se jedná především o stanovení odolnosti a schopnosti ochrany posádky kokpitem tedy přední části trupu dle paragrafu CS 22.561 (b) (2). Dále pak dle doporučení OSTIV SDP jde o prověření deformací a schopnosti pohlcení energie přední části trupu pro danou dopadovou rychlost a prověření zatížení které bude působit na pilota během tohoto nárazu.

8.1 ZATÍŽENÍ ODPOVÍDAJÍCÍ PŘEDPISU CS22

Simulace byla provedena podle požadavků předpisu CS 22.561(b)(2). Předpis požaduje aby, konstrukce byla navržena tak, aby dávala pilotovi na palubě velkou šanci na vyvážnutí bez závažných zranění v případě nouzového přistání za předpokladu důsledného použití bezpečnostních pasů. Působí na přední část směrem do zadu pod úhlem 45° síla o velikosti 6-ti násobku hmotnosti větroně.

8.1.1 MKP Model

Pro zatěžování MKP modelu a v reálu i trupu byl použit vahadlový systém. Tento byl modelován tak, aby co nejvěrohodněji simuloval vahadlový systém, kterým byla zatížena reálná konstrukce kluzáku při zkoušce. Vahadlový systém zavádí síly do křídelních závěsů a do sedačky. To má simulovat zatížení od setrvačných sil hmotnosti pilota.



Obrázek 9 – Celkový MKP model

Zatížení MKP modelu bylo realizováno konstantním posunem tuhé dopadové plochy ve směru její normály rychlostí $0,3535 \text{ [ms}^{-1}\text{]}$.

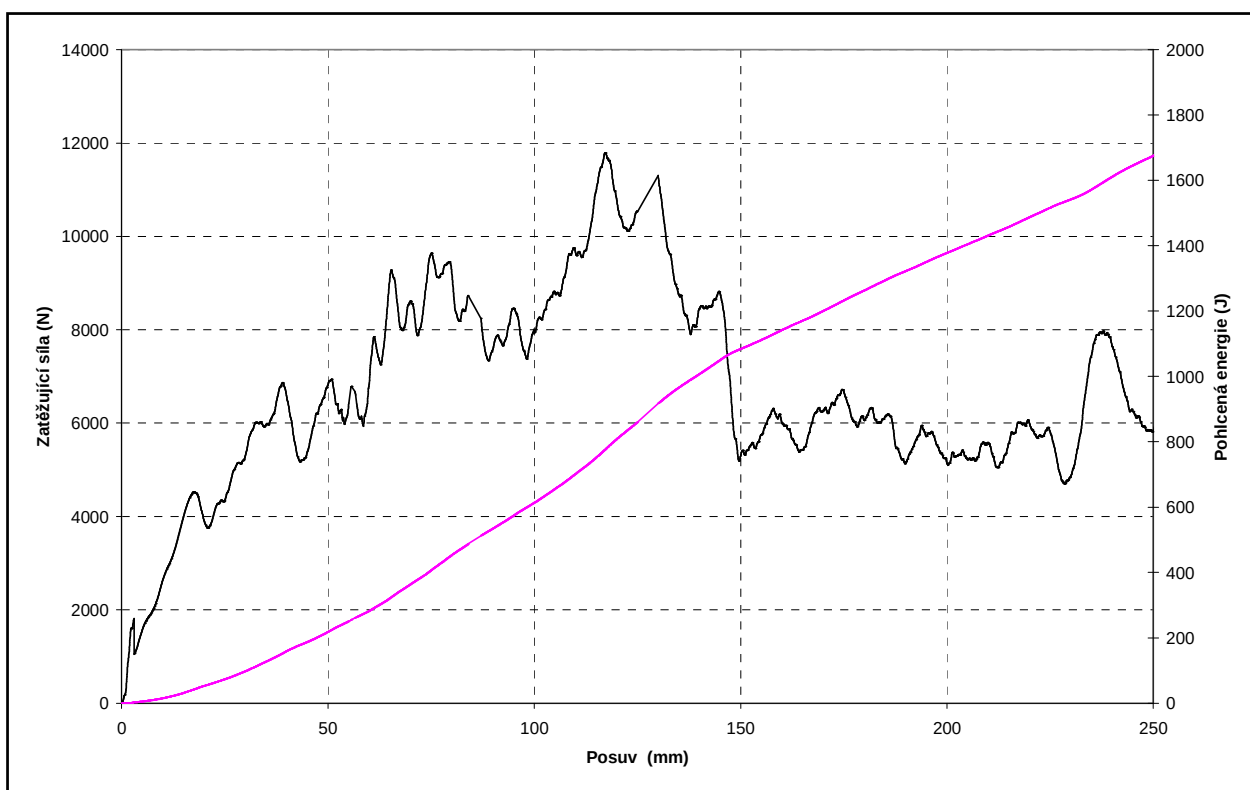
Na konec vahadlového systému bylo aplikováno vetknutí, které omezovalo šest stupňů volnosti.

Mezi dopadovou plochou a kluzákem je předepsaný master-slave surface kontakt.

8.1.2 Výsledky

V průběhu simulace byla zaznamenávána síla v uchycení lana vahadlového systému. Průběh této síly ukazuje graf 3, je ještě doplněn průběh energie pohlcené konstrukcí. Tato energie byla vypočtena na základě průběhu síly a posunutí dopadové plochy. Během simulace bylo dosaženo zatěžující síly

$F = 11781,6 \text{ [N]}$ a hodnota pohlcené energie dosáhla $A = 1674,23 \text{ [J]}$



Graf 3 – Průběh zatěžující síly a pohlcené energie při MKP simulaci

8.2 ZATÍŽENÍ ODPOVÍDAJÍCÍ DOPORUČENÍ OSTIV SDP

8.2.1 MKP model

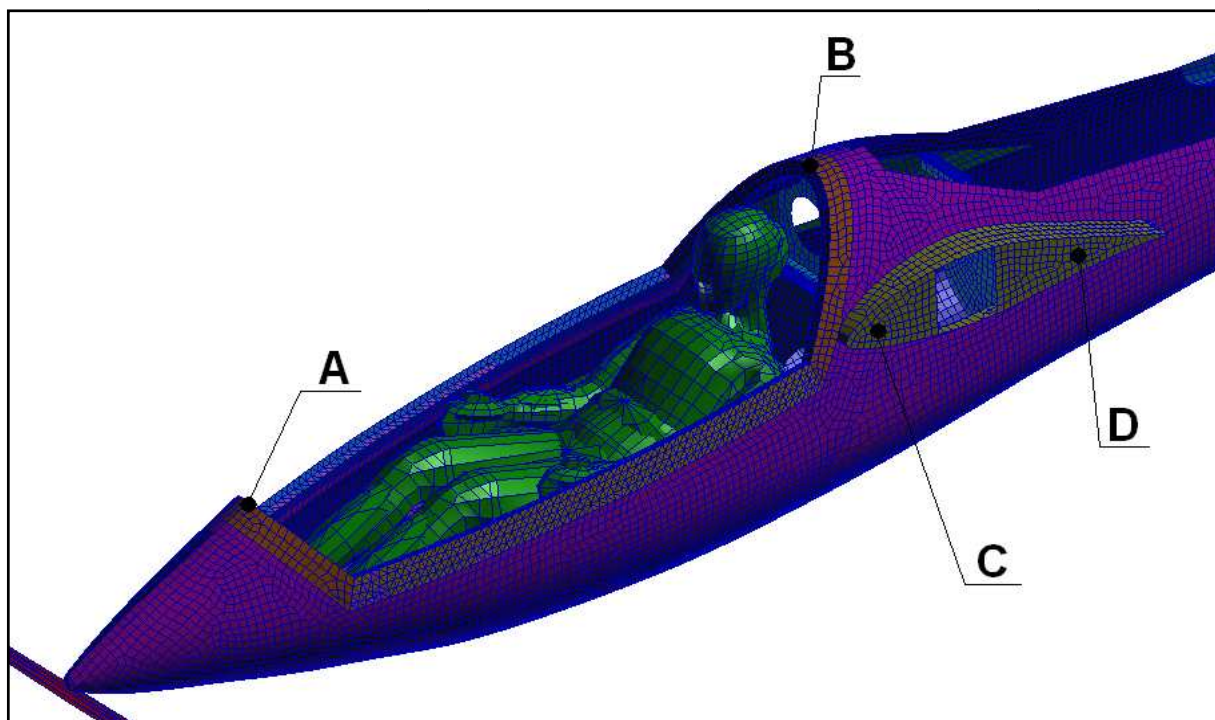
MKP model pro toto zatížení byl shodný s MKP modelem použitým pro zatížení dle CS22. Pro tuto simulaci byl z MKP modelu odstraněn vahadlový systém a dále byly doplněny hmoty nahrazující křídla a ocasní část tak, aby byla jeho minimální vzletová hmotnost shodná se skutečným kluzákem.

Pro tuto simulaci byl ještě model doplněn o MKP model DUMMY figuríny. Tato byla usazena na sedačku a dále byla poutána čtyřbodovým pásem.

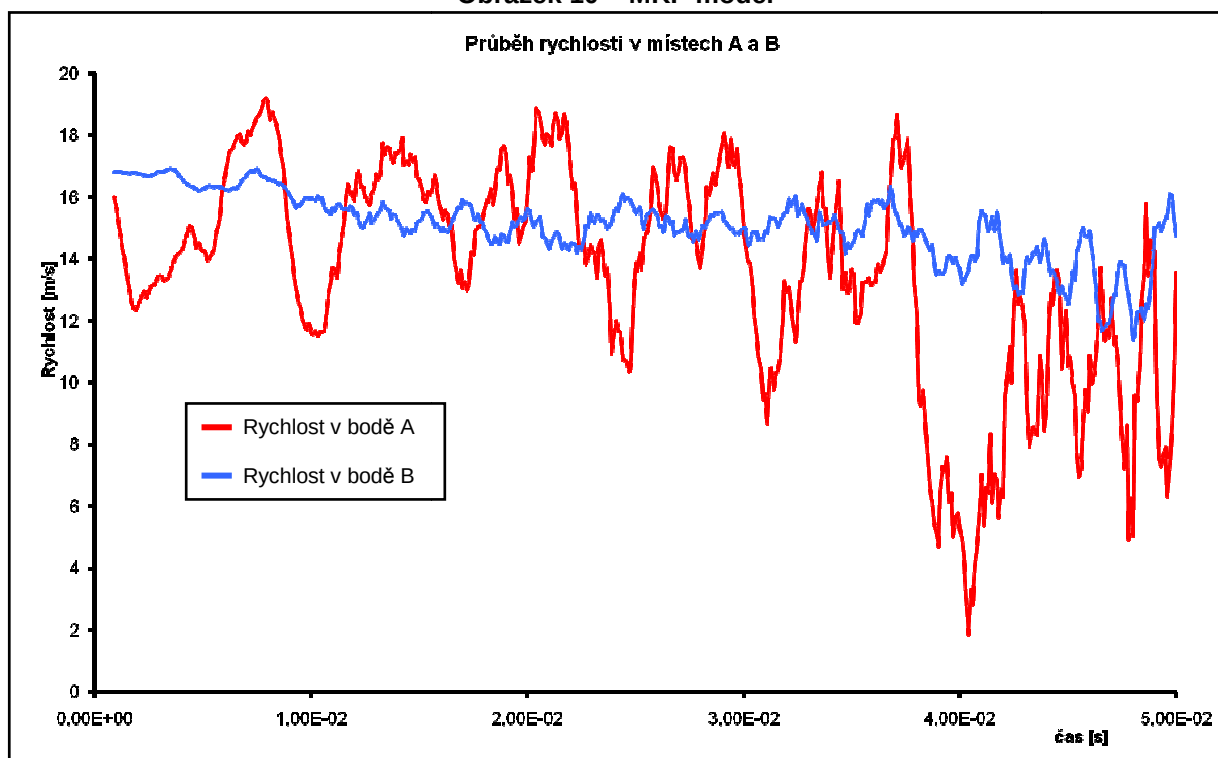
Podélný řez celým modelem ukazuje obrázek 10.

8.2.2 Výsledky simulace:

V průběhu simulace byly sledovány rychlosti a zrychlení ve vybraných místech na DUMMY figuríně a ve vybraných místech na trupu. Místa na trupu ve kterých byla sledována rychlost na trupu ukazuje obrázek 12 . Pro figurínu se jedná především o zrychlení v hlavě viz graf 6.



Obrázek 10 – MKP model



Graf 4 – Průběh rychlosti v místech A a B

9 ZKOUŠKA TRUPU DLE PŘEDPISU CS 22

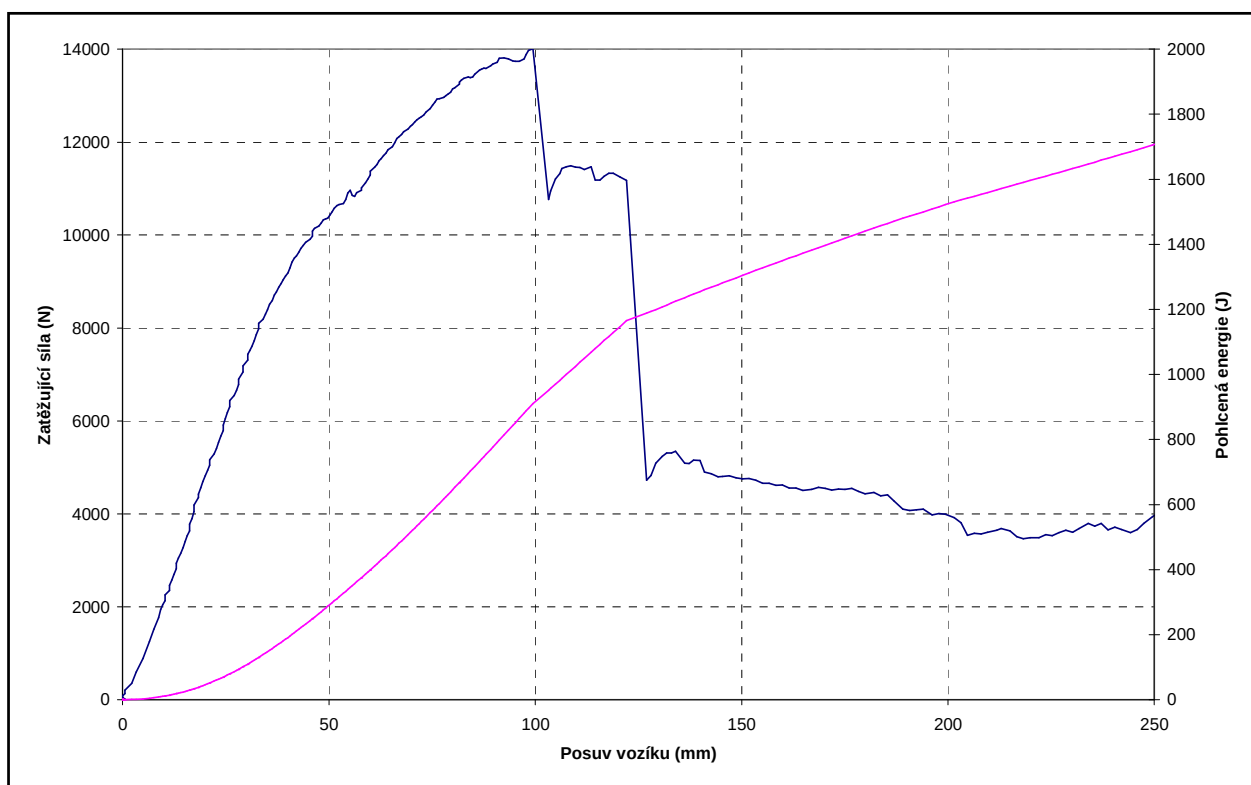
Na zkušebně leteckého ústavu byla provedena zkouška kabiny celokompozitového kluzáku podle požadavků předpisů CS 22.561 (b)(2). Naměřené výsledky byly síla působící na desku a posunutí kluzáku.

Kluzák byl upnut za závěsy křídla do ocelového rámového vozíku, který byl schopen posuvu po svislých stojanech. Kluzák byl v rámovém vozíku upnutý tak, aby podélná osa trupu svírala se zemí úhel 45° nosem k zemi. Hmotnost rámového vozíku a kluzáku byla vyvážena pytlíky s ocelovou drtí přes kladkový mechanismus. Zatížení bylo vyvozeno dvěma hydraulickými válci řazenými v sérii a lany přes vahadlový systém rozdělující celkovou sílu. Měřena byla celková síla v laně.

Průběh celkové zatěžující síly je znázorněn v grafu 7. V průběhu zatěžování došlo k porušení konstrukce kabiny kluzáku.

9.1 VÝSLEDKY ZKOUŠKY

V průběhu zkoušky byla dosažena síla $F = 14010,8 \text{ [N]}$ a energie pohlcená konstrukcí $A = 1711,66 \text{ [J]}$.



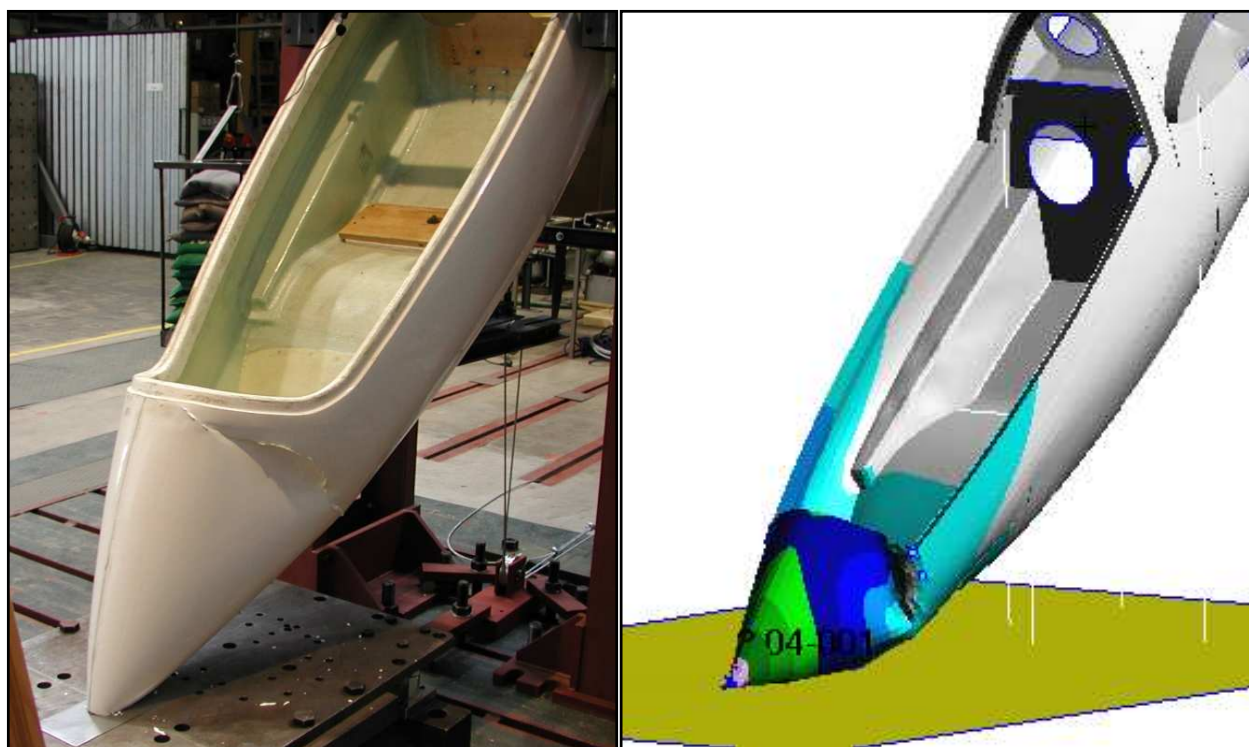
Graf 5 – Průběh zatěžující síly a energie pohlcené konstrukcí během zkoušky

9.2 POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH A VYPOČTENÝCH HODNOT

Byla porovnána hodnota maximální síly a energie absorbované konstrukcí, které bylo dosaženo při posunutí 250 [mm]. Tyto hodnoty byly porovnány jak ve své absolutní hodnotě tak i jako procentuální rozdíl.

MKP simulace		Hodnoty ze zkoušky		Rozdíl hodnot	
				absolutní	procentuální
síla	11781,6 [N]	síla	14010,8 [N]	2229,2	15,9 %
energie	1674,23 [J]	energie	1711,66 [J]	37,43	2,18 %

Tabulka 3 – Porovnání hodnot



Obrázek 11 – Porovnání vzniklých poruch

10 ZÁVĚR

Předkládaná disertační práce se zabývá problematikou analýzy a výpočtem deformace letounu při havarijních případech zatížení s využitím systému MKP pro velké deformace MSC.Dytran. Její obsahová stránka vychází z výsledků simulací prováděných autorem v průběhu období doktorandského studia na Leteckém ústavu FSI v Brně. Při řešení dané problematiky se ukázalo nezbytné použití daného MKP řešiče umožňující řešit úlohy s velkými deformacemi konstrukce a s velkými rychlostmi těchto deformací.

V této práci jsou naznačeny postupy a metodiky pro řešení MKP analýz a symulací v oblasti havarijních případů zatížení kokpitu a sedaček letounu. Dále pak možnosti využití DUMMY figuríny při těchto analýzách a simulacích. Jedná se o zatížení odpovídající předpisu CS22. 561 (b)2 a doporučení OSTIV SDP pro kokpit kluzáku a zatížení dle předpisu CS23 562 pro sedačky malých sportovních letadel.

V průběhu řešení probíhala těsná spolupráce s průmyslem. Význam této spolupráce je zejména v tom, že průmysl poskytl technologicky, výrobně a finančně náročný vzorek pro experimentální zkoušky a nezbytné ověření teoretických výpočtů. Z tohoto pohledu dokumentuje shodu analýzy na základě metody konečných prvků s výsledky zkoušek tabulka 3 a obrázek 11. Tato tabulka dokumentuje dobrou shodu výpočtu s průběhem zkoušky. Dosažená shoda a přesnost pevnostních výpočtů s výsledky pevnostních zkoušek dovoluje následné snížení počtu prováděných zkoušek.

Závěrem bych chtěl poděkovat Prof. Ing. Antonínu Píšťkovi, CSc. za cenné připomínky, podnětné návrhy a rady a vytvoření podmínek pro spolupráci s průmyslem.

POUŽITÉ ZKRATKY

JAR	(Joint Aviation Regulations) – Evropské letecké předpisy
FAR	(Federal Aviation Regulations) – Federální letecké předpisy
OSTIV	("Organisation Scientifique et Technique Internationale du Vol à Voile)- Nezávislá mezinárodní nezisková organizace
ATD	(Anthropometric Test Dummy) – testovací figurína
ATB	(Articulated Total Body) – kloubový model těla figuríny
MKP	(FEM-Finite Element Metod) - metoda konečných prvků
GEBOD	Generator of Body Data – generator dat figuríny
LU	Letecký ústav, fakulty strojního inženýrství VUT v Brně
VUT	Vysoké učení technické v Brně

LITERATURA

- [1] Join Aviation Regulation-23, Amendment 1, JAA, 2001
- [2] Join Aviation Regulation-22, Amendment 1, JAA, 2001
- [3] MSC.Software Corporation: MSC.Dytran User's Manual Version 2005, MSC.Software Corporation, Santa Ana, 2004
- [4] MSC.Software Corporation: MSC.Dytran Theory Manual Version 2005, MSC.Software Corporation, Santa Ana, 2004
- [5] MSC.Software Corporation: MSC.Dytran Dytran Coupling Seminar, MSC.Software Corporation, Santa Ana, 2004
- [6] BELYTSCHKO T., KAM-LIU W., MORAN B.: Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures, John Wiley&Sons Ltd., Chichester, 2001
- [7] COOK R.D., MALKUS D.S., PLESHA M.E.: Concepts and Applications of Finite Element, John Wiley&Sons, Inc., New York, 1989

CIRRICULUM VITAE

JMÉNO

Jan Šplíchal

OSOBNÍ DATA

Stav: svobodný

Státní příslušnost: Česká republika

Národnost: česká

Datum a místo narození: 31. srpna 1977, Prostějov

VZDĚLÁNÍ

2000 – 2003 Letecký ústav, Fakulta strojního inženýrství,
Vysoké učení technické, Technická 2, Brno, 616 69
Specializace: Konstrukční a procesní inženýrství – postgraduální studium

Téma disertační práce: Analýza a výpočet deformace letounu při havarijním
přistání a využitím systému MKP pro velké deformace
MSC.Dytran

Datum státní doktorské zkoušky 6. 12. 2006

1995 – 2000 Letecký ústav, Fakulta strojního inženýrství,
Vysoké učení technické, Technická 2, Brno, 616 69
Specializace: stavba letadel – magisterské studium
Datum státní závěrečné zkoušky: červen 2000

1991 – 1995 Střední průmyslová škola strojnická v Prostějově,
Lidická 2, Prostějov, 796 01

ZAMĚSTNÁNÍ

2001 - doposud Technicko-hospodářský pracovník Centra leteckého a
kosmického výzkumu, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké
učení technické v Brně

KURZY, KONFERENCE, SEMINÁŘE

- 2004 Školení produktu Structural Analysis usány SimDesigner,
10-12. 8. 2004, Brno
- 2004 Setkání uživatelů INFO DNY MSC.SOFTWARE s.r.o.,
26-27.5.2004, Brno
- 2003 Seminář CLKV 2003, 15-16. 10. 2002, ČVUT Praha
- 2003 Setkání uživatelů INFO DNY MSC.SOFTWARE s.r.o.,
28-29.5.2003, Brno, *bez příspěvku*
- 2003 Konference Advanced Engineering Design 2003 (AED2003), 1-4.6. 2003,
ČVUT Praha, *poster*
- 2002 Seminář CLKV 2002, 15-16. 10. 2002, VUT-FSI, Brno
- 2002 Seminář Výpočty konstrukcí metodou konečných prvků 2002, 14. 11.,
bez příspěvku

JAZYKOVÉ ZNALOSTI

Němčina

VĚDECKO – VÝZKUMNÁ ČINNOST

- 2004 – řešitel grantového projektu BD 134 3069, „Dynamický výpočet sedačky
letounu VUT 100“
- 2003 – řešitel grantového projektu FP 330057, „Bezpečnost kokpitu kluzáku při
havarijních případech zatížení“

PUBLIKACE AUTORA

- [1] ŠPLÍCHAL, J., **Využití systému MSC.Dytran pro účely ověření bezpečnosti při havarijních případech zatížení větroně**
prezentace, akce: Seminář CLKV 2002, Brno, 15.10.2002-16.10.2002
- [2] ŠPLÍCHAL, J., **Využití systému MSC.Dytran pro účely ověření bezpečnosti při havarijních případech zatížení větroně**
článek ve sborníku, akce: Setkání uživatelů MSC produktů 2002, Brno, 29.05.2002-30.05.2002
- [3] ŠPLÍCHAL, J., PÍŠTĚK, A., **Využití systému MSC.Dytran pro účely ověření bezpečnosti při havarijních případech zatížení větroně**,
Letecký zpravodaj , Vol.2003, (2003), No.1, pp.19-22, ISSN 1211-877X,
Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s.
článek v časopise
- [4] ŠPLÍCHAL, J., **Crashworthines of Airplanes**,
Letecký zpravodaj , Vol.2003, (2003), No.3, pp.12-14, ISSN 1211-877X,
Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s.
článek v časopise
- [3] JURAČKA, J.; ŠPLÍCHAL, J., **Using 3D fabric on light glider fuselage**,
Composites Testing and Model Identification, Book of Abstracts, pp.19-21,
(2004), University of Bristol
článek ve sborníku, akce: 2nd international conference on composites testing and model identification, Bristol, 21.09.2004-23.09.2004
- [4] ŠPLÍCHAL, J., **Dynamický výpočet pilotní sedačky letounu VUT 100**
zpráva
- [5] ŠPLÍCHAL, J., **Dynamic anlysis of aircraft seat according to FAR/JAR 23 regulation**, 2nd Intrnational PhD Conference on Mechanical Engineering -
PhD 2004, pp.129-258, ISBN 80-7043-330-2, (2004), Západočeská univerzita
v Plzni
článek ve sborníku, akce: 2nd International PhD Conference on mechanical Engineering - PhD 2004, Srní, 08.10.2004-10.10.2004

- [6] AUGUSTIN, P.; PLHAL, M.; ŠPLÍCHAL, J., **FEM Based Fatigue Life Analysis of Landing Gear**,
Letecký zpravodaj , Vol.2005, (2005), No.3, pp.6-8, ISSN 1211-877X,
VZLÚ, a.s.
článek v časopise

- [7] ŠPLÍCHAL, J., **Dynamic Analysisi of Aircraft Seat According to FAR/JAR 23 regulation**,
4th Youth Symposium on Experimental Solid Mechanics, pp.97-194, ISBN 88-901080-2-9, (2005), University of Bologna
článek ve sborníku, akce: 4th Youth Symposium on Experimental Solid Mechanics, Bologna, 04.05.2005-07.05.2005

- [8] MALIŠ, M.; ŠPLÍCHAL, J., **The Sailplane Cockpit Structure during Emergency Landing Condition**,
CD PROCEEDINGS, pp.1-7, ISBN 0-9533991-7-6, (2006), Optimage Ltd.,
Edinburgh, UK
článek ve sborníku, akce: 25th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, Hamburg, 03.09.2006-08.09.2006

- [9] MALIŠ, M.; ŠPLÍCHAL, J. , **Simulace napoví jak přežít pád letadla**,
Computer Design, Vol.2006, (2006), No.3, pp.24-27, ISSN 1212-4389,
Computer Press, a.s.
článek v časopise

- [10] PLHAL, M.; ŠPLÍCHAL, J., **Crashworthiness of Aircraft Seat**,
CD PROCEEDINGS, pp.1-4, ISBN 0-9533991-7-6, (2006), Optimage Ltd.,
Edinburgh, UK
článek ve sborníku, akce: 25th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, Hamburg, 03.09.2006-08.09.2006

ABSTRACT

On one hand, not only requirements on aircrafts certification but also requirements on higher passive safety of cockpit increase in connection with present growth in number of run and developed aircrafts included in the category CS 22 previously JAR 22 and CS 23, FAR 23 previously FAR/JAR 23. On the other hand, there is strong producers' demand on minimization of cost connected with certification and development of these aircrafts, and also processes of passive safety verifications.

Problem can be solved by using the Finite Element Method (FEM) for simulation and analyses of these load cases. This leads to decrease in number of necessary tests, or partial or total replacement of the tests.

This category of certification tests particularly includes cases of structures loads such as seats, seat belts, the front part of aircraft, etc. loads for these parts are set and defined in aviation requirements and recommendations. These requirements prescribe the structure load necessary to protect sufficiently people on board, considerable deformation and structure failure is possible in the process.

Aviation requirements require dynamic analyses and tests, or simulations. Here is necessary to include large deformations and high speeds of these deformations that come under the category of load cases, which verified the ability of aircraft structure or their parts to protect or reduce serious injury of crew. This concerns individual load cases during emergency landing and crash events. Individual aircraft categories, mentioned in this work, are in accordance with aviation requirements.

As for gliders, these are determinations of resistance and the ability to protect the crew with cockpit, which means the front part of a fuselage in accordance with paragraph CS 22.561 (b) (2). Furthermore, on OSTIV SDP recommendation, these are analysis of deformation and ability to absorb energy of the front part of fuselage for given impact speed and analysis of the load affected a pilot during this impact.

As for small sport aircrafts, these are analyses of pilot and crew seats, restraint systems (combination of a seat and a given safety belt) and possible origin of inadequate load of sitting people and bound on them. These are two basic load cases in accordance with paragraph CS 23.562.

MSC.Dytran was used as a solution for these FEM analyses and simulations, which enabled to solve tasks with large deformations and high deformation speeds. MSC.Dytran was created in 1991 by combination of MSC.Dyna (Finite Element Method FEM) and MSC.Pisces (Finite Volume Method). This system is meant for simulation of high-speed response of bodies, structures and gases. It enables to solve extensive practical problems in many different industries. The program is designed to be used for simulations and analyses with short-term loads with extreme material deformation, interaction of gas and structures. Typical applications are for example initiation of airbags and interaction of crew, impact of a bird on aircraft, explosion in a transport container inside of aircraft and many others.

An ATB-dummy is used during simulations and analyses of Finite Element Method (FEM) to set the load that affects the crew and passengers. The dummy is generated with GEBOD program, version V, which is included in MSC.Dytran system. Program GEBOT can be used to generate the input file for usage of ATB-dummy.