

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ**



ÚSTAV LETADLOVÉ TECHNIKY

Motorové lože malého sportovního letounu

Engine mounts for light sport aircraft

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2017

Josef Horký

Studijní program: Letectví a kosmonautika
Studijní obor: Letadlová a kosmická technika
Vedoucí práce: Ing. Tomáš Sommer

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Horký** Jméno: **Josef** Osobní číslo: **410862**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**
Studijní program: **Letectví a kosmonautika**
Studijní obor: **Letadlová a kosmická technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Motorové lože malého sportovního letounu

Název diplomové práce anglicky:

Engine mount for light sport aircraft

Pokyny pro vypracování:

- Rešerše možných úprav vybraného pohonného agregátu
- Konstrukční návrh zástavby pohonného agregátu do trupu letounu se zaměřením na motorové lože
- Stanovení zatížení motorového lože
- Pevnostní kontrola motorového lože a jeho uložení v trupu
- Hmotový rozbor a stanovení polohy těžiště motorového lože, motoru a jeho příslušenství

Seznam doporučené literatury:

Dle pokynů vedoucího

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Tomáš Sommer, ústav letadlové techniky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **28.04.2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **07.08.2017**

Platnost zadání diplomové práce:



Podpis vedoucí(ho) práce



Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



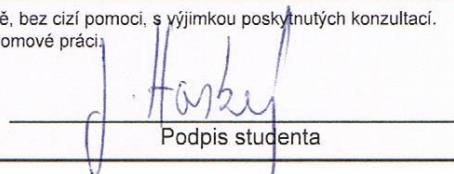
Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

28. 4. 2017

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní ČVUT v Praze.

Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 7. srpna 2017

.....
podpis

Poděkování

Úvodem bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Tomáši Sommerovi za pomoc, kterou mi poskytl při zpracování této práce. Rovněž děkuji panu Ing. Karlu Barákovi a panu Ing. Zdeňku Neusserovi, Ph.D. za odbornou konzultaci v oblasti kompozitů a mechaniky těles.

Obsah

1.	Úvod.....	1
1.1	Základní informace o letounu UL-39 Albi.....	1
1.2	Konstrukční popis motoru ROTAX 1503 4-TECH.....	4
1.2.1	Sání motoru	6
1.2.2	Výfuková soustava	6
1.2.3	Chladicí soustava.....	7
1.2.4	Mazací soustava	8
1.2.5	Palivový systém	8
1.2.6	Elektrický systém	9
2.	Návrh zástavby pohonné jednotky do draku letounu.....	10
2.1	Umístění motoru v draku letounu.....	10
2.2	Konstrukční návrh motorového lože	10
2.2.1	Nosníkové lože.....	11
2.2.2	Motorové lože prutové (příhradové).....	12
2.2.3	Uložení motoru na kompozitních podpěrách	13
2.3	Konstrukční úpravy motoru a jeho systémů.....	15
2.3.1	Sání motoru	15
2.3.2	Výfuková soustava	16
2.3.3	Chladicí soustava.....	17
2.3.4	Mazací soustava	19
2.3.5	Motorové komponenty.....	19
3.	Pevnostní kontrola motorového lože	22
3.1	Požadavky stavebních předpisů.....	22
3.1.1	Případy zatížení podle předpisů UL – 2 a CS – VLA	23
3.2	Stanovení zatížení motorového lože	24
3.2.1	Souřadný systém letounu.....	24
3.2.2	Zatížení motorového lože.....	24
3.2.3	Numerický výpočet zatížení.....	25
3.3	Výpočet reakcí motorového lože	28
3.3.1	Souřadný systém motoru	28
3.3.2	Analytický výpočet.....	29
3.3.2.1	Rovnice rovnováhy.....	29
3.3.2.2	Výpočet – I. přiblížení.....	30
3.3.2.3	Výpočet – deformační metoda.....	32
3.3.2.4	Zkouška tuhosti silentbloků	36
3.3.3	Výpočet metodou konečných prvků.....	41
3.3.4	Tabulka reakcí závěsů motoru	42
3.4	Pevnostní kontrola motorového lože	43
3.4.1	Příprava výpočtu motorového lože	43
3.4.2	Návrh skladby kompozitního materiálu podpěr	44
3.4.3	Výpočet a vyhodnocení výsledků analýzy MKP	49
3.5	Pevnostní kontrola šroubů.....	53
3.6	Pevnostní kontrola lepeného spoje.....	58

4.	Hmotový rozbor	62
4.1	Motor a jeho příslušenství	62
4.2	Motorové lože.....	63
5.	Závěr	65
6.	Seznam použité literatury	66
7.	Přílohy	68
7.1	Změřené tuhostní charakteristiky silentbloků	68
7.2	Zdrojový kód analytického výpočtu reakcí (Matlab R2012b).....	72
7.3	Vlastnosti použitých materiálů (kompozitní podpěry) a lepidla.....	75
7.4	Pevnostní kontrola šroubů.....	76
7.5	Pevnostní kontrola lepeného spoje.....	79

Seznam obrázků

Obr. 1 Schéma propulzního systému.....	2
Obr. 2 Třípohledový výkres letounu	3
Obr. 3 Výkonové charakteristiky motoru v režimu standart a sport (predikce).....	5
Obr. 4 Model motoru Rotax 1503	5
Obr. 5 Schéma sací soustavy	6
Obr. 6 Schéma výfukové soustavy	7
Obr. 7 Chlazení výfuku a intercooleru	7
Obr. 8 Schéma chladicí soustavy	8
Obr. 9 Umístění pohonné jednotky v draku letounu	10
Obr. 10 Nosníkové lože.....	11
Obr. 11 Prutové lože.....	12
Obr. 12 Uložení na kompozitních podpěrách.....	13
Obr. 13 Závitová vložka (M8x1,25).....	14
Obr. 14 Uložení silentbloku na podpěře.....	14
Obr. 15 Vzduchový filtr KN RU-3103 HBK	15
Obr. 16 Intercooler	15
Obr. 17 Soustava sání.....	16
Obr. 18 Výfuková soustava	17
Obr. 19 Chladič motocyklu Yamaha R1 (2009-2011)	18
Obr. 20 Spojení chladiče s vodním čerpadlem.....	18
Obr. 21 Plnicí hrdlo - originál	19
Obr. 22 Navržené plnicí hrdlo	19
Obr. 23 Kompresor ET 70-145	20
Obr. 24 Hliníkové sací potrubí.....	20
Obr. 25 Ojnice	20
Obr. 26 Váčková hřídel	21
Obr. 27 Setrvačnický Zdroj.....	21
Obr. 28 Ozub. kolo váčkové hřídele	21
Obr. 29 Sací a výfukový ventil.....	21
Obr. 30 Obálka provozních násobků (min. hmotnost).....	22
Obr. 31 Schéma souřadného systému letadla včetně kladných smyslů momentů	24
Obr. 32 Rozklad setrvačné síly F na složky F_x a F_z v souřadném s. letadla	25
Obr. 33 Souřadný systém motoru.....	28
Obr. 34 Zatížení od tíhy a krouticího momentu motoru	29
Obr. 35 Princip určení ramen sil	30
Obr. 36 Zvolené souřadné systémy O, X_1, Y_1, Z_1 a CG, X_2, Y_2, Z_2	32
Obr. 37 Souřadný systém motoru - nezatíženého (A, B, C), zatíženého (A', B', C') vnější silou a momentem	34
Obr. 38 Model silentbloku B (přední).....	36
Obr. 39 Model silentbloku A (C - boční)	36
Obr. 40 Závěs A (C) umístěný v přípravku.....	36
Obr. 41 Způsob měření tuhosti silentbloku.....	37

Obr. 42 Schéma modelu motoru pro výpočet reakcí MKP	41
Obr. 43 Síťový model.....	44
Obr. 44 Skladby materiálu podpěry A	45
Obr. 45 Podpěra B - skladba materiálu	47
Obr. 46 Směry materiálu v laminátu	49
Obr. 47 Součinitel poruchy kompozitu (zatížení č. 4, podpěra A).....	50
Obr. 48 Součinitel poruchy kompozitu (zatížení č. 8, podpěra B).....	51
Obr. 49 Součinitel poruchy kompozitu (zatížení č. 3, podpěra C).....	51
Obr. 50 Schéma zatížení silentbloku (rovina XY)	53
Obr. 51 Schéma zatížení silentbloku (roviny YZ a XZ)	53
Obr. 52 Schéma zatížení lepeného spoje.....	58
Obr. 53 Normálové reakce spoje.....	59
Obr. 54 Polohy těžiště (modře-lože, zeleně-motor, červeně-motor+lože+příslušenství)	64

Seznam tabulek

Tab. 1 Základní parametry motoru Rotax 1503	4
Tab. 2 Predikované hodnoty výkonu.....	5
Tab. 3 Havarijní násobky dle předpisu UL-2	23
Tab. 4 Početní zatížení – minimální hmotnost letounu	26
Tab. 5 Početní zatížení - maximální hmotnost letounu	27
Tab. 6 Boční a havarijní zatížení.....	27
Tab. 7 Velikosti jednotlivých úhlů a spojnic.....	31
Tab. 8 Přehled tuhostí silentbloků.....	38
Tab. 9 Výsledky - deformační metoda	40
Tab. 10 Reakce v závěsech od G a Mk řešené analyticky a MKP	42
Tab. 11 Reakce závěsů motoru od vybraného zatížení	42
Tab. 12 Podpěra A - skladba č. 1	45
Tab. 13 Podpěra A - skladba č. 2	45
Tab. 14 Podpěra A - skladba č. 3	46
Tab. 15 Podpěra C - skladba č. 1.....	46
Tab. 16 Podpěra C - skladba č. 2.....	46
Tab. 17 Podpěra C - skladba č. 3.....	47
Tab. 18 Podpěra B - skladba č. 1.....	47
Tab. 19 Podpěra B - skladba č. 2.....	48
Tab. 20 Podpěra B - skladba č. 3.....	48
Tab. 21 Celkové součinitele poruchy kompozitu.....	52
Tab. 22 Hmotnosti komponentů motoru zatěžující lože	62
Tab. 23 Hmotnosti komponentů příslušenství nezatěžující lože.....	63
Tab. 24 Poloha těžiště motoru (blok+kompresor, čerpadlo, olej. chladič)	63
Tab. 25 Hmotnosti komponentů motorového lože.....	63
Tab. 26 Těžiště motorového lože	63
Tab. 27 Celková hmotnost pohonného agregátu	63
Tab. 28 Poloha těžiště pohonného agregátu	64
Tab. 29 Materiály skladby kompozitních podpěr.....	75
Tab. 30 Vlastnosti lepidla.....	75

Seznam příloh

Změřené tuhostní charakteristiky silentbloků

Zdrojový kód analytického výpočtu reakcí (Matlab R2012b)

Vlastnosti použitých materiálů (kompozitní podpěry) a lepidla

Pevnostní kontrola šroubů

Pevnostní kontrola lepeného spoje

Výkresová dokumentace

Seznam použitých symbolů

α	[°]	úhel náběhu
d	[mm]	průměr
E	[Nmm ⁻²]	modul pružnosti v tahu
f	[-]	součinitel bezpečnosti
F	[N]	obecná síla
F_T	[N]	posouvající síla
FI	[-]	součinitel porušení kompozitu
G	[N]	tíhová síla
g	[m.s ⁻²]	tíhové zrychlení
j	[-]	jistota
J	[mm ⁴]	moment setrvačnosti průřezu šroubu
K	[N·mm ⁻¹]	tuhost
m	[kg]	hmotnost
m_{eng}	[kg]	hmotnost motoru
M	[N.mm]	moment síly
M_k	[N.m]	krouticí moment
M_{kk}	[N.m]	utahovací moment šroubu
M_{TH}	[N.m]	třecí moment pod hlavou šroubu
M_Z	[N.m]	krouticí moment v dřívku šroubu
μ	[-]	Poissonovo číslo
n	[-]	násobek tíhového zrychlení
n_b	[-]	provozní násobek v bočním směru
n_H	[-]	havarijní násobek
P	[W]	výkon motoru
Q_0	[N]	montážní předpětí šroubu
ρ	[kg·m ⁻³]	hustota materiálu
S_3	[mm ²]	plocha řezu šroubu
S_1	[mm ²]	plocha lepeného poje
S	[Nmm ⁻²]	podélná mez pevnosti ve smyku kompozitu
σ_N	[Nmm ⁻²]	normálové napětí
σ_1, σ_2	[Nmm ⁻²]	normálové napětí v kompozitu (směr 1, 2)
σ_{red}	[Nmm ⁻²]	redukované napětí
σ_{pt}	[Nmm ⁻²]	napětí na mezi pevnosti materiálu
τ	[Nmm ⁻²]	smykové napětí
u	[mm]	deformace
x_T, y_T, z_T	[mm]	souřadnice těžiště
X, Y, Z	[-]	osy souřadného systému letadla
X_1, Y_1, Z_1	[-]	osy souřadného systému spojeného ze země (nehybné)
X_2, Y_2, Z_2	[-]	osy souřadného systému motoru
X_T, Y_T	[Nmm ⁻²]	meze pevnosti v tahu kompozitu (směr 1,2)
X_C, Y_C	[Nmm ⁻²]	meze pevnosti v tlaku kompozitu (směr 1,2)

Seznam použitých zkratek

BMW	Bayerische Motoren Werke
CS-VLA	Certifikační specifikace ultralehkých letadel
EFI	Electronic fuel injection systém (elektronické vstřikování paliva)
EMS	Systém řízení motoru
HP	Horsepower (koňská síla, 1HP = 745,7W)
NACA	National Advisory Commitee for Aeronautics
Rotax	BRP-Rotax GmbH & Co KG (rakouský výrobce motorů)
SLZ	Sportovní létající zařízení
SOHC	Single Over Head Camshaft (rozvod s jednou vačkovou hřídelí)
SOP	Svislá ocasní plocha
UL	Ultralehké letadlo
UL-2	Certifikační specifikace ultralehkých letadel
VOP	Vodorovná ocasní plocha

Seznam použitých programů

Microsoft Word
Microsoft Excel
MATLAB R2012b
NX 8.5

Abstrakt

Horký, J.: Motorové lože malého sportovního letounu: diplomová práce. Praha: ČVUT – České vysoké učení technické, Fakulta strojní, Ústav letadlové techniky, 2017, 81 s. Vedoucí práce: Sommer, T.

Předmětem této práce je konstrukční návrh zástavby motoru Rotax 1503 4-TEC do letounu UL-39 Albi. Návrh je zaměřen především na motorové lože, které je koncipováno v souladu se stavebními předpisy UL-2 a CS-VLA. Dále jsou navrženy úpravy vybraných systémů motoru tak, aby vyhovovaly provozním požadavkům ultralehkého létání. Na základě stavebních předpisů je stanoveno zatížení zvolené varianty lože, na které je následně provedena jeho pevnostní kontrola. Na závěr je vypočtena výsledná hmotnost pohonného agregátu včetně lože a určena poloha jejich těžiště.

Abstract

Horký, J.: Engine mounts for light sport aircraft. Prague: CTU – Czech Technical University, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Aerospace Engineering, 2017, 81 p. Thesis head: Sommer, T.

The subject of the thesis is proposal for installation of the Rotax 1503 4-tech engine into the aircraft UL-39 Albi. The project is mainly focused on engine mounts, which is designed in accordance with regulations UL-2 and CS-VLA. Further, modifications of selected engine systems are proposed to meet the operational requirements of ultra-light flying. On the basis of regulations is defined load of chosen mounts. Then a load strength analysis is performed. Finally, the resulting mass of drive unit including the mount is calculated and the position of their center of gravity is determined.

Klíčová slova

Letoun, motor, motorové lože, motorové soustavy, stavební předpis, zatížení, reakce, pevnostní kontrola, hmotový rozbor, těžiště

Key words

Aircraft, engine, engine mounts, engine systems, certification specifications, load, reaction force, strength analysis, mass analysis, center of gravity

1. Úvod

Letoun UL-39 Albi, vyvíjený na Ústavu letadlové techniky ČVUT, je jediným zástupcem ve své kategorii poháněný dmychadlovým propulzním systémem. Pohon ventilátoru zajišťuje v současné době motor ze sportovního motocyklu BMW S1000RR. Tento motor byl ve své době zvolen s ohledem na příznivý poměr výkonu a hmotnosti. Výkon motoru (výrobce uvádí 142 kW) je ale dosažen při poměrně vysokých otáčkách (13 000 ot/min). Takto vysoké otáčky je třeba redukovat pro optimální provoz dmychadla.

V poslední době se na trhu objevily pokročilé motory určené pro vodní skútry. Tyto motory vykazují řadu předností oproti motocyklovým agregátům použitých pro pohon letounu. Dosahují vyšších výkonů v nižším rozsahu otáček. Odpadají tak redukční členy v systému. Výstupní hřídel, umístěná v ose symetrie motoru, snižuje požadavky na zastavěný prostor. Celková kompaktnost a příznivá hmotnost motoru předurčují jeho možnou aplikaci v navrženém propulzním systému.

Cílem této práce je návrh zástavby vybraného motoru pro vodní skútry Rotax 1503 do letounu UL-39 Albi. V rámci této zástavby bude především navrženo motorové lože. Dle stavebních předpisů bude stanoveno zatížení, na které bude následně provedena jeho pevnostní kontrola. Dále budou navrženy úpravy vybraných motorových systémů tak, aby byla možná jejich aplikace v ultralehkém letounu. Na závěr bude stanovena celková hmotnost motoru s navrženými soustavami a určeno jejich těžiště.

1.1 Základní informace o letounu UL-39 Albi

Letoun UL-39 Albi je jednomotorový, dvoumístný, celokompozitový dolnoplošník kategorie ultralight, určený pro sportovní létání, či výcvik pilotů. Koncepce letounu vychází z kategorie aerodynamicky řízených sportovních létajících zařízení (SLZ) stavebního předpisu UL-2 a zároveň vyhovuje požadavkům předpisu CS-VLA.

Samonosné lichoběžníkové křídlo s hlavním průběžným nosníkem a dvojicí pomocných nosníků je vybaveno Fowlerovou vztlakovou klapkou a koncovými vřeteny. Kořenový profil s tloušťkou 13 % (profil MS 0313) je vůči základní rovině trupu natočen o úhel 2° . Křídlo má vzepětí 4° a je geometricky krouceno 3° tak, že koncový profil s tloušťkou 10 % (MS 0310) je natočen o úhel -1° (vzhledem k základní rovině trupu).

Přímý hlavní nosník leží v 37,5 % hloubky profilu. Pomocí dvojice podélných čepů je uchycen k centroplánu letounu. Spolu s pomocným šikmým nosníkem tvoří podvozkovou šachtu. V místě jejich styku je umístěn závěs hlavního podvozku. Pomocný nosník je uchycen k motorové přepážce podélným čepem.

Vztlaková klapka má relativní hloubku 30 %. Nastavuje se do tří poloh: 0° (let na hladině), 15° (vzlet) a 35° (přistání).

Křídélko, s relativní hloubkou 37 %, má krajní dolní polohu 19° a horní 27° . Je osově aerodynamicky odlehčeno a hmotově vyváženo.

Součástí křídla je dvojice integrálních nádrží, která vyplňuje prostor vymezený hlavním nosníkem, dvěma žebry a přední pomocnou přepážkou.

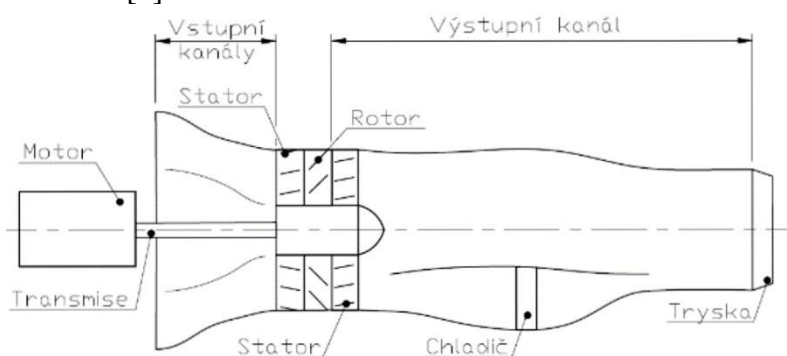
Ocasní plochy jsou klasického uspořádání, dělené na pevnou část a kormidlo. Na VOP i SOP je použit symetrický profil NACA 0012. Relativní hloubka směrového a výškového kormidla je 40 %.

Skořepinová konstrukce trupu je tvořena sendvičem z uhlíkového nebo hybridního (uhlík-aramid) kompozitu a pěny na bázi polyuretanu. Samotná skořepina je doplněna nosnými přepážkami a výztuhami. Přední část trupu tvoří aerodynamický radom, upevněný k první přepážce. Na této přepážce je uložen příďový podvozek. Za ní se nachází kabina. Ta je tvořena integrální kompozitní vanou s tandemově uspořádanými sedadly a bočními panely. Palubní desky jsou součástí překrytu kabiny, který je vyroben jako nedělený z organického skla. Kabina je ukončena za sedadlem druhého pilota protipožární přepážkou, která ji odděluje od motorového prostoru. V tomto prostoru je uložena pohonná jednotka (motor, hřídel, ventilátor) a vstupní kanály pro přívod vzduchu. Celý prostor je zesílen přepážkou. Zadní část trupu tvoří integrální konstrukce s kýlovou plochou a vodorovným stabilizátorem. Její součástí je výstupní kanál s obtokem, který je zakončen tryskou.

Podvozek je typu obrácený tricykl s řízeným nebrzděným příďovým kolem a brzděnými hlavními koly. Příďový podvozek je odpružen přes pružnici z hybridního kompozitu otočně uloženou v kovovém pouzdře. Zatahuje se do podvozkové šachty ve směru letu pomocí hydraulické soustavy. Šachta je v zasunuté poloze uzavřena krytem. Konstrukční řešení odpružení hlavního podvozku je shodné s příďovým, vyjma otočně uložených kovových pouzder pružnic. Hlavní podvozek, uchycený k nosníkům křídla, se zatahuje obdobným způsobem jako příďový ve směru k rovině symetrie letounu.

Kormidla letounu jsou mechanicky ovládána zdvojeným řízením, které tvoří soustava táhel a pák z uhlíkového kompozitu. Vztlková mechanizace je ovládána pomocí hydraulické soustavy. [1]

Pohonná jednotka letounu sestává z dmychadlového propulzního systému. Ten je tvořen pístovým spalovacím motorem, vstupními kanály, předstatorem, nízkotlakým axiálním ventilátorem, statorem a výstupním kanálem s tryskou. Celý systém je schematicky znázorněn na následujícím obrázku. [2]



Obr. 1 Schéma propulzního systému;

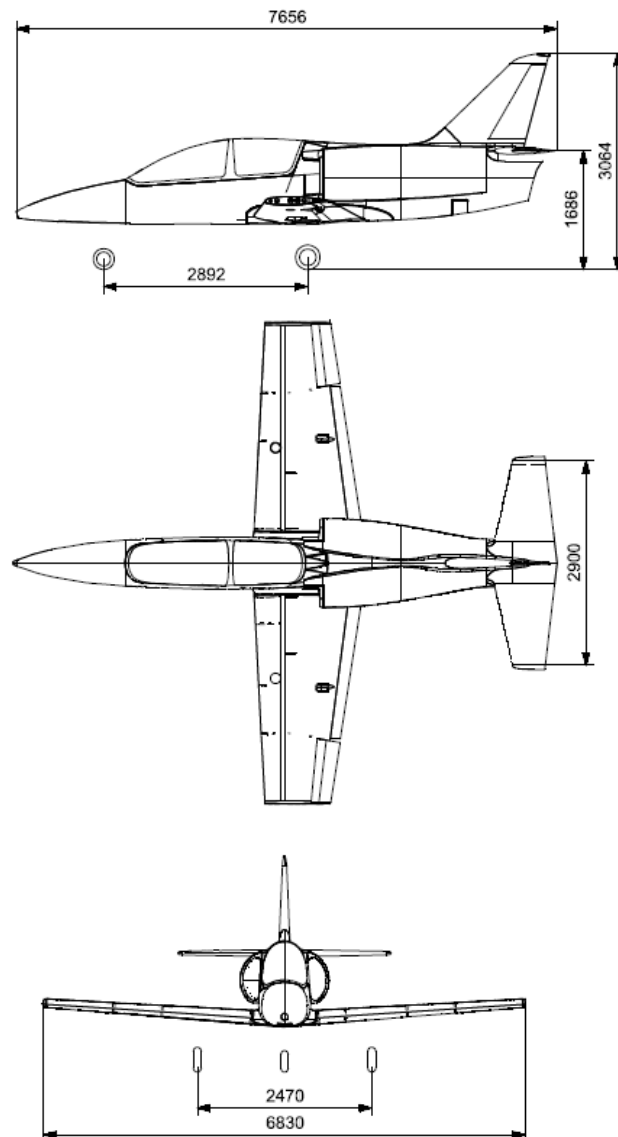
Zdroj: Helmich, Sommer: Konstrukční úpravy motoru pro pohon ventilátoru

Proud vzduchu vstupuje do propulzního systému přes vstupní ústrojí na bocích trupu. Součástí ústrojí jsou řezače mezní vrstvy, které separují vrstvy vzduchu s nízkou kinetickou energií. Dále je proud veden dvojicí bočních kanálů (kalhot) k předstatoru nízkotlakého ventilátoru. Ten vytváří vhodné proudové pole pro rotor, který je poháněn pístovým spalovacím motorem. Ventilátor je koncipován tak, aby výstupní proud vzduchu měl

v návrhovém režimu pouze axiální rychlost. Urychlený proud je za ventilátorem rozdělen do dvou větví. V první větvi je vzduch veden výstupním kanálem přímo do trysky, umístěné na konci proudovodu. Druhou větev tvoří obtok pro přívod vzduchu k motorovému chladiči. Geometrie obtoku byla optimalizována pro minimalizaci tlakové ztráty vlivem aerodynamického odporu chladiče. Chladicí vzduch je poté sveden zpět do výstupního kanálu, který jej usměrní do výtoké trysky.

Pístový spalovací motor je zastoupen jednotkou Rotax 1503 s maximálním výkonem 260 HP (dle výrobce). Výkon motoru je přenášen hřídelí přímo (bez vloženého reduktoru) na rotor ventilátoru. [2]

Samotná hřídel je složena ze tří částí – kovová hřídel motoru, kompozitní transmisní hřídel a hřídel rotoru. Transmisní tenkostěnná hřídel je slepena s přírubami (unašeči) obou hřídelí. Hřídel rotoru je uložena ve valivém ložisku ve statoru. Toto ložisko přenáší axiální sílu (tah) a značnou část radiálních sil od ventilátoru přes statorové lopatky do trupu letounu. Motorová hřídel je spojena se samotným motorem pomocí drážkování (soudkovitý tvar) přenášející pouze radiální síly. Toto řešení umožňuje malou nesusosost transmisní soustavy. [2]



Obr. 2 Třípohledový výkres letounu

1.2 Konstrukční popis motoru ROTAX 1503 4-TECH

Rotax 1503 4-TECH je zážehový, tříválcový, čtyřtaktní, řadový motor o objemu 1493,8 cm³. Motor je určený primárně pro pohon vodních skútrů, z čehož pramení určitá konstrukční řešení, s nimiž se v letectví nesetkáváme. Na druhé straně tato pohonná jednotka vykazuje velmi dobrý poměr hmotnosti a výkonu při nižším počtu otáček. Z toho důvodu není nutné upravovat otáčky na výstupní hřídeli reduktorem. Výstupní hřídel je navíc v ose symetrie motoru, což je výhodné z hlediska nároků na zástavbu do trupu letounu. Tyto výhodné vlastnosti motoru předurčují jeho možnou aplikaci v letectví.

Motor je přeplňovaný radiálním kompresorem, který je mechanicky spojen s klikovou hřídelí. Stlačený vzduch je ochlazován v chladiči (intercooleru) tak, aby se zvýšila jeho hustota a tím se do spalovacího prostoru válce nasálo větší množství vzduchu. V sacích kanálech je vzduch smíšen s palivem prostřednictvím elektronicky řízených trysek a následně je ve válci stlačen v kompresním poměru 8,4:1.

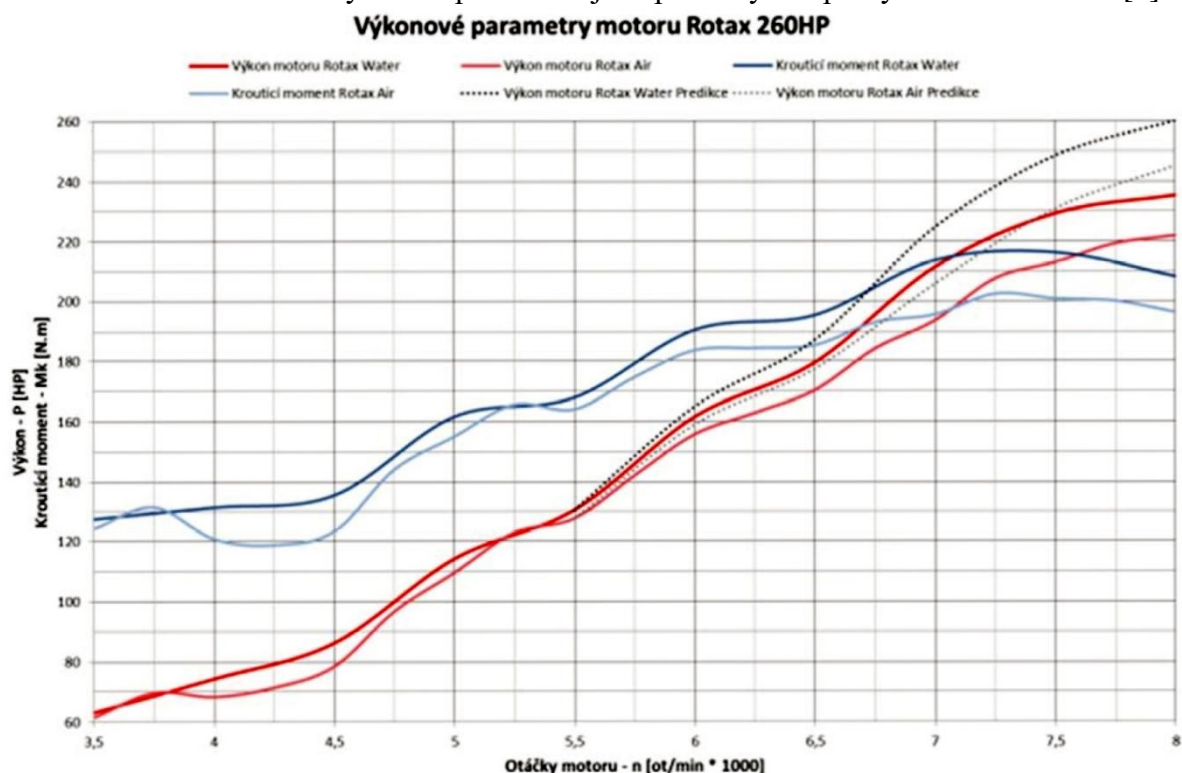
Ventilový rozvod motoru je typu SOHC. Tedy jediná vačková hřídel umístěna v hlavě válců ovládá přes vahadla všech 12 ventilů. Dva ventily pro sání a dva pro výfuk na jediném válci zlepšují plnění motoru vzduchem a zároveň odvod spalin ze spalovací komory. [3] Základní parametry motoru jsou shrnuty v následující tabulce.

Tab. 1 Základní parametry motoru Rotax 1503

Technické údaje motoru	
Objem [cm ³]	1493,8
Výkon při otáčkách [kw]	193,9 (260 HP)/8000
Točivý moment při otáčkách [Nm]	242 (7500)
Počet válců	3
Uspořádání válců	řadové
Rozvod	SOHC
Počet ventilů	12
Dvoudobý/čtyřdobý	4
Vrtání [mm]	100
Zdvih [mm]	63,4
Sání vzduchu	přeplňováno kompresorem+intercooler
Příprava směsi	vstřikovací trysky
Kompresní poměr	8,4:1
Max. otáčky-static./dynamic.	8000/8300
Chlazení	kapalinové (uzavřené)
Typ mazání	suchá kliková skříň
Elektrická soustava	12V, 360W
Hmotnost [kg] (včetně příslušenství)	89

Zdroj: Bombardier Recreational Products Inc. 2012 4-TECH SHOP MANUAL

Ve výpočtech v této práci budou využity hodnoty výkonu a krouticího momentu změřené na motorové brzdě. Průběhy těchto parametrů jsou převzaty ze zprávy TZP/ULT/23/15 [4].



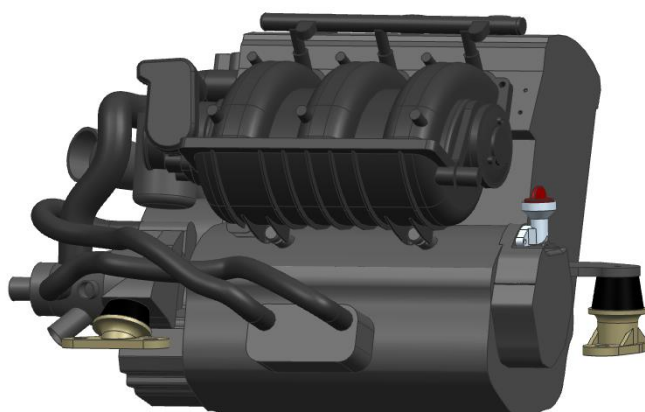
Obr. 3 Výkonové charakteristiky motoru v režimu standart a sport (predikce)

Zdroj: Helmich M. a Sommer T. Výkonové charakteristiky pohonného agregátu. *Technická zpráva ULT č. TZP/ULT/23/15*. Praha, 2015.

Z naměřených parametrů jsou převzaty hodnoty predikovaných výkonů motoru v režimu sport se vzduchovým mezichladičem (viz Tab. 2). V této konfiguraci bude motor pravděpodobně provozován.

Tab. 2 Predikované hodnoty výkonu

Výkon motoru [W]	Hodnota
Vzletový (8000 ot/min)	181600
Max. trvalý (6000 ot/min)	117800

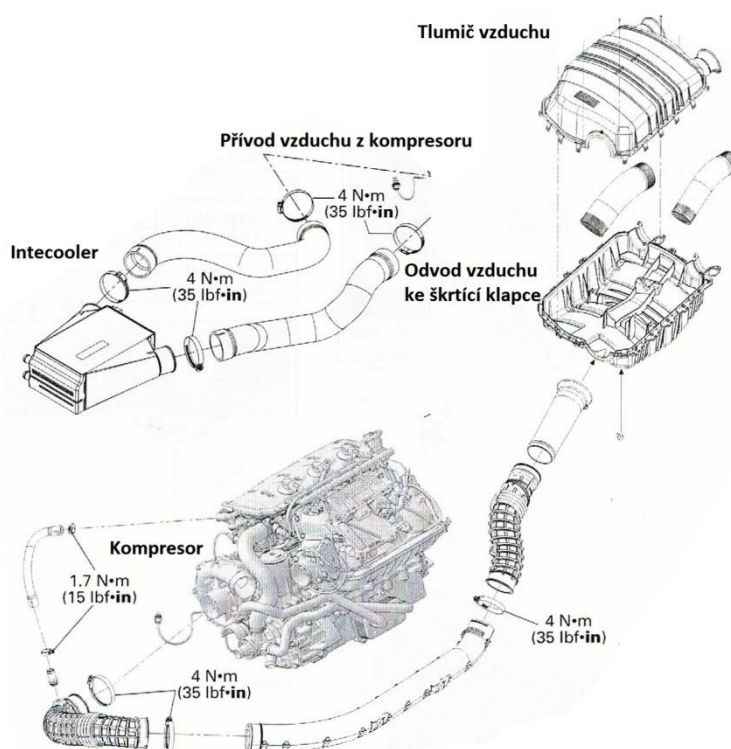


Obr. 4 Model motoru Rotax 1503

1.2.1 Sání motoru

Vzduch je do motoru nasáván přes tlumič, který omezuje nepříjemné zvuky ze sacího ústrojí a také odděluje větší nečistoty. Dále je soustavou hadic veden do kompresoru, kde je stlačen. Zároveň se zvyšuje jeho teplota a snižuje se tedy jeho hustota. Proto následně směřuje do chladiče, kde je mu část tepla odebrána a předána chladicí kapalině (voda z otevřeného chladicího okruhu). Po ochlazení je tlačěn přes škrticí klapku, která omezuje jeho průtok do sacích kanálů (airboxu). Tam je umístěn vzduchový filtr, který zamezuje nasátí drobných nečistot do válců.

Radiální kompresor pracuje už při volnoběžném režimu. Jeho otáčky jsou 5,4x větší než otáčky klikové hřídele, se kterou je mechanicky spojen. Tlaková diference vzduchu před a za kompresorem je 65 kPa (9,5 psi). [3]

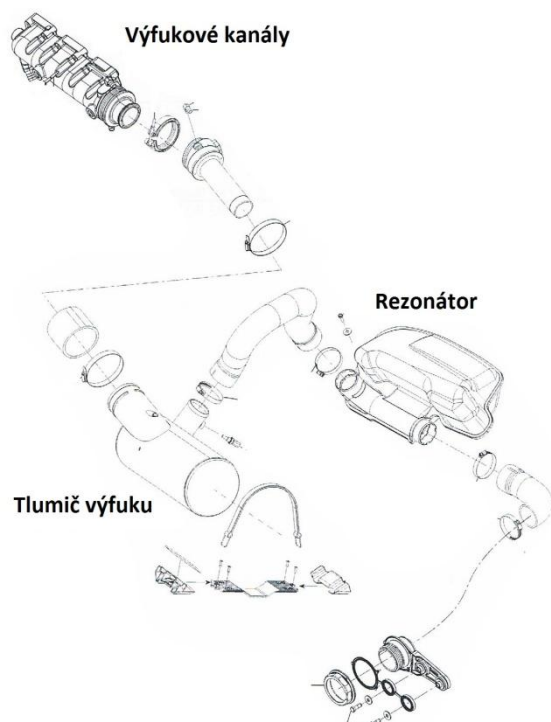


Obr. 5 Schéma sací soustavy;

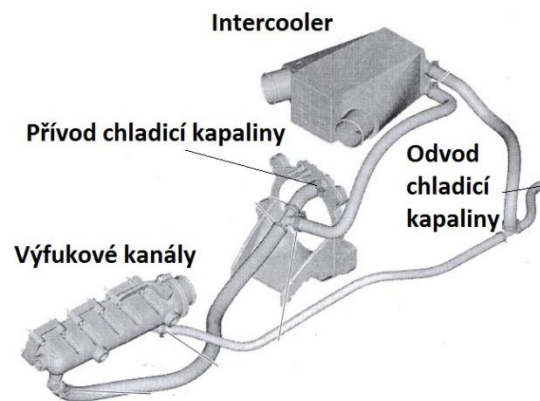
Zdroj: Bombardier Recreational Products Inc. 2012 4-TECH SHOP MANUAL

1.2.2 Výfuková soustava

Při hoření směšeného paliva se vzduchem vznikají spaliny, které jsou odváděny ze spalovacího prostoru přes dvojici ventilů do výfukových kanálů. Kanály jsou vystaveny vysoké teplotě, proto jsou chlazeny vodou. Voda je do okruhu tlakována propulzorem. Cirkuluje v otevřeném okruhu (nasávána a vypouštěna zpět do vodní plochy) a částečně je vstříkována z výfukových kanálů do tlumiče. Z tlumiče je vedena spolu se spalinami výfukovým potrubím přes rezonátor pod vodní hladinu. Vstříkávání vody do výfukového systému má rovněž příznivý efekt na vypouštění emise. [5]



Obr. 6 Schéma výfukové soustavy
Zdroj: Bombardier Recreational Products Inc. 2012
4-TECH SHOP MANUAL



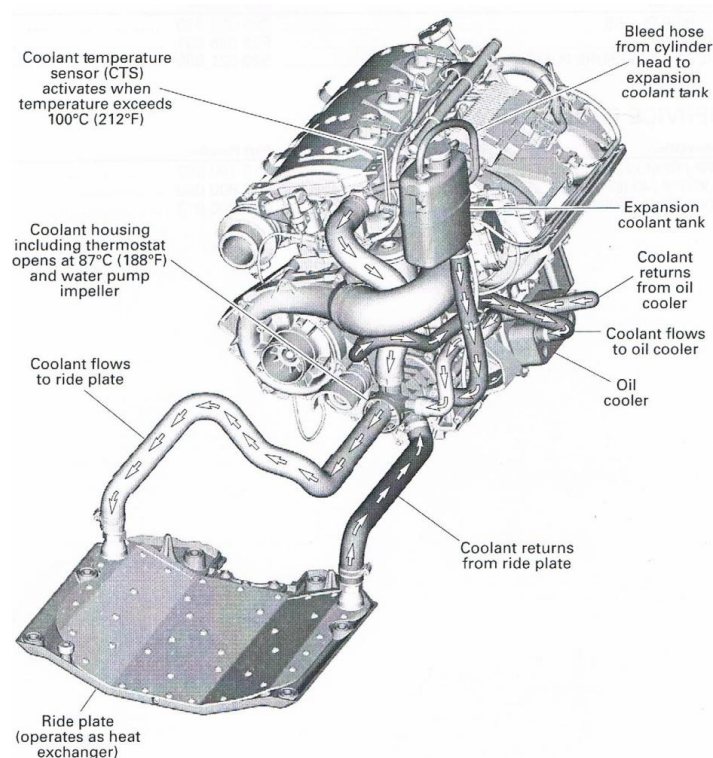
Obr. 7 Chlazení výfuku a intercooleru
Zdroj: Bombardier Recreational Products Inc. 2012
4-TECH SHOP MANUAL

1.2.3 Chladicí soustava

Chlazení motoru tvoří uzavřený okruh, aby do něj nevstupovala znečištěná voda z okolí. Systém udržuje konstantní teplotu (termostat) a zabraňuje vnitřní korozi motoru. Průtok chladicí kapaliny motorem je zajištěn vodní pumpou (čerpádlem), která je mechanicky spojena s klikovou hřídelí. Ochlazená kapalina proudí blokem motoru do hlav válců, kde pomocí soustavy kanálů ochlazuje výfukové a sací ventily. Poté se hadicí vrací zpět do čerpadla. V závislosti na teplotě motoru je termostatem směřována zpět do bloku motoru nebo do chladiče. Chladič předává teplo od chladicí kapaliny okolní vodě. V okruhu je 5,5 litrů chladicí směsi, která je tvořena Ethylen-glycolem a destilovanou vodou. Teplota chladicí kapaliny je udržována na hodnotě 87 °C. Při této teplotě motor vykazuje nejlepší výkonnostní a emisní hodnoty.

Chladicí kapalina rovněž ochlazuje prostřednictvím samostatného tepelného výměníku motorový olej.

Systém je monitorován pomocí teplotního čidla, které je umístěno na hlavě válců. [5]



Obr. 8 Schéma chladicí soustavy;

Zdroj: Bombardier Recreational Products Inc. 2012 4-TECH SHOP MANUAL

1.2.4 Mazací soustava

Mazání motoru zajišťuje soustava s tzv. suchou klikovou skříní. Z čehož vyplývá, že olej je shromažďován v olejové vaně, odkud je přes filtr tlakovým čerpadlem vháněn do soustavy. Tlakové čerpadlo je zubového typu poháněné vyvažovací hřídelí. Olej je nejprve ochlazen ve výměníku a poté je přes filtr přiváděn pod písty, k ložiskům klikového ústrojí, k rozvodům a ke kompresoru. Zpět do olejové vany je odsáván sacím čerpadlem, umístěným na přední straně motoru u plnicího hrdla.

Tlak oleje v soustavě je usměrňován tlakovým regulátorem pružinového typu. Hodnota tlaku je monitorována tlakovým čidlem. Pohybuje se v rozmezí od 228 – 500 kPa v závislosti na otáčkách a teplotě motoru. Celá soustava pojme 4,5 l oleje. [3]

1.2.5 Palivový systém

Silovým členem soustavy je elektrické palivové čerpadlo s integrovaným tlakovým regulátorem, které dodává palivo z nádrže přes filtr do palivového kolektoru. Kolektor zajišťuje potřebné množství benzínu pro palivové trysky během provozu. Trysky vstříkují palivo o tlaku v rozmezí 386 – 414 kPa (50 – 60 psi) do sacích kanálů. Na každý válec připadá jedna tryska.

Celá soustava je monitorována pomocí senzorů a elektricky řízena prostřednictvím systému EFI (Electronic fuel injection system). [3]

1.2.6 Elektrický systém

Systém zapalování

Parametry zapalovacího okruhu jako např. časování zážehu, doba zážehu a pořadí zapalování jsou kontrolovány systémem řízení motoru (EMS) tak, aby vyhověly provozním požadavkům. Systém EMS je schopen detekovat řadu abnormalit, např. zkrat jak v primárním vinutí cívky, tak i v přidružených obvodech. Pokud systém vyše signál k primárnímu vinutí cívky, pak se na cívce sekundárního vinutí indukují vysoké napětí, jehož důsledkem je přeskočení jiskry na zapalovací svíče.

Systém omezuje otáčky motoru na hodnotu 8300 ot/min prostřednictvím redukce dodávky paliva a časování zážehu. [3]

Dobíjecí soustava

Účelem soustavy je během provozu udržovat baterii v plně nabitém stavu a poskytovat elektrickou energii závislým systémům pro jejich správný chod. Základem celé soustavy je magneto, které transformuje magnetické pole na střídavý elektrický proud o výkonu 380 W. Pomocí usměrňovače a přepětového regulátoru se střídavý proud transformuje na stejnosměrný o maximálním napětí, aby nešlo k poškození elektrických komponentů.

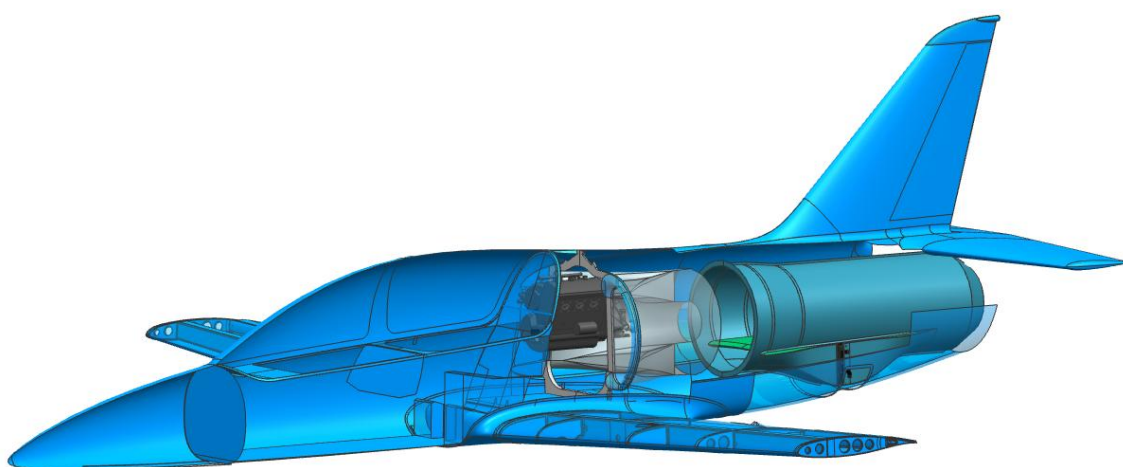
Během startu pomáhá dynamu baterie roztočit motor a zásobit elektřinou všechny připojené systémy. Baterie rovněž podporuje magneto v režimu nízkých otáček motoru a současně vysoké proudové zátěži. [3]

2. Návrh zástavby pohonné jednotky do draku letounu

2.1 Umístění motoru v draku letounu

Motor je uložen ve střední části trupu za motorovou přepážkou, aby bylo vyhověno několika požadavkům. Základní požadavek je umístění v blízkosti významných hmot, a tedy co nejbližší těžišti letounu. Dále pak byla zohledněna potřeba vhodného přístupu v rámci pravidelných kontrol údržby motoru a určitá kompaktnost celého propulzního systému. Poloha motoru je určena osou klikového hřídele, která musí být shodná s osou transmisní hřídele ventilátoru.

Instalace motoru bude realizována přes odnímatelnou přední motorovou přepážku. V provozu bude zajištěn přístup k motoru montážními otvory pod řezači mezní vrstvy. [2]



Obr. 9 Umístění pohonné jednotky v draku letounu

2.2 Konstrukční návrh motorového lože

Prostřednictvím motorového lože se pohonná jednotka spojuje s drakem letounu. Na jeho konstrukci jsou kladeny základní požadavky:

- Minimální hmotnost při maximální pevnosti a tuhosti
- Pružné spojení motoru a draku
- Snadný přístup a výměna motoru včetně jeho příslušenství
- Možnost nastavení osy motoru v daných směrech
- Vhodná distribuce zatížení do okolní konstrukce
- Zamezení přenosu tepelných deformací motoru do okolní konstrukce draku

V následující části budou popsány předběžné návrhy konstrukčních variant uložení motoru Rotax 1503 do draku letounu. Jednotlivé varianty budou hodnoceny podle zmíněných kritérií. Na základě těchto kritérií bude vybrána jedna varianta, která bude dále podrobněji zpracována.

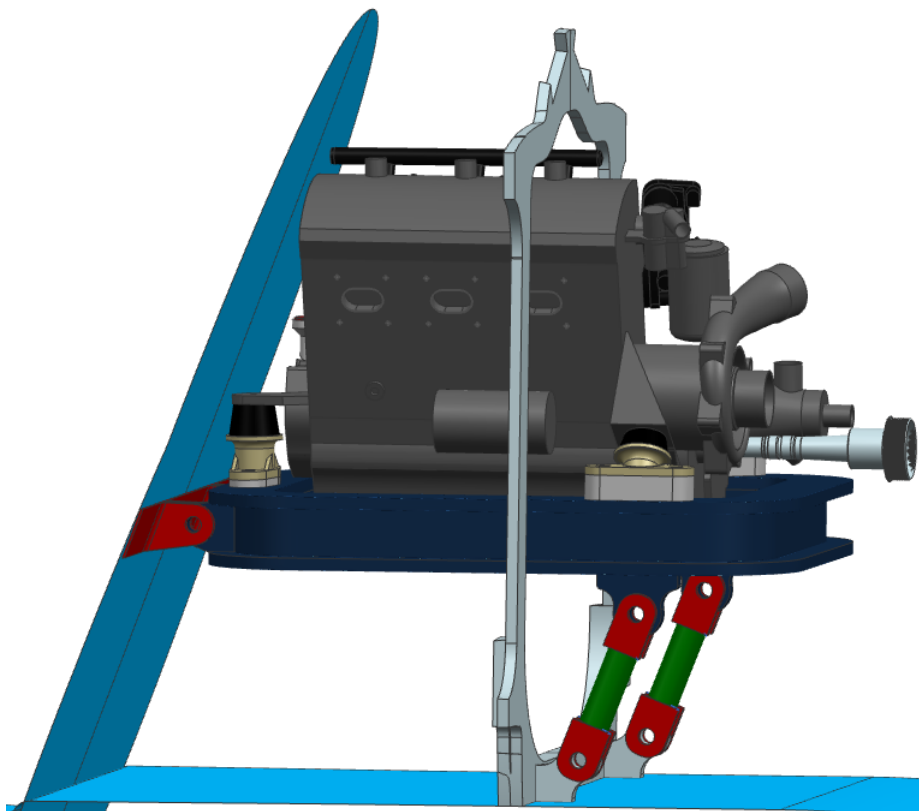
2.2.1 Nosníkové lože

Nosníkové lože se nejčastěji využívá u řadových pístových motorů. Lože se obvykle skládá ze dvou nosníků, na které je přes čtveřici čepů uchycen motor [6]

Navržené uložení motoru Rotax 1503 je tvořeno uzavřeným rámem a dvojicí vzpěr. I-profilový nosník rámu je vpředu kloubově uchycen k přepážce a přibližně v místě zadních závěsů je podepřen vzpěrami. Rám je uzavřený, aby vykazoval dobrou tuhost. Nosník by mohl být vyroben z lehké slitiny nebo kompozitu. Vzpěry by byly řešeny ocelovými trubkami, které jsou na koncích kloubově uchyceny. Kloubový spoj nepřenáší ohybový moment do konstrukce, snižuje nároky na přesnost výroby a usnadňuje montáž. Pro snazší zastavění motoru do draku je konstrukce závěsů vzpěr stavitelná.

Nevýhodou tohoto uložení by byla jeho vyšší hmotnost a větší zastavěný prostor. Dále by okolní konstrukce v místě závěsů byla vystavena větším lokálním zatížením.

V této variantě byly pod tělesa silentbloků vloženy distanční podložky, které vymezují prostor mezi nimi a vodorovným rámem tak, aby nekolidovala zadní část rámu s výstupní hřídelí (viz Obr. 10). Další možnou variantou je podélné natočení rámu, aby na něj přímo dosedaly boční silentbloky. Toto řešení je hmotnostně výhodnější, ale vyžaduje potočení bočních silentbloků o příslušný úhel a překlenutí výstupní hřídele.



Obr. 10 Nosníkové lože

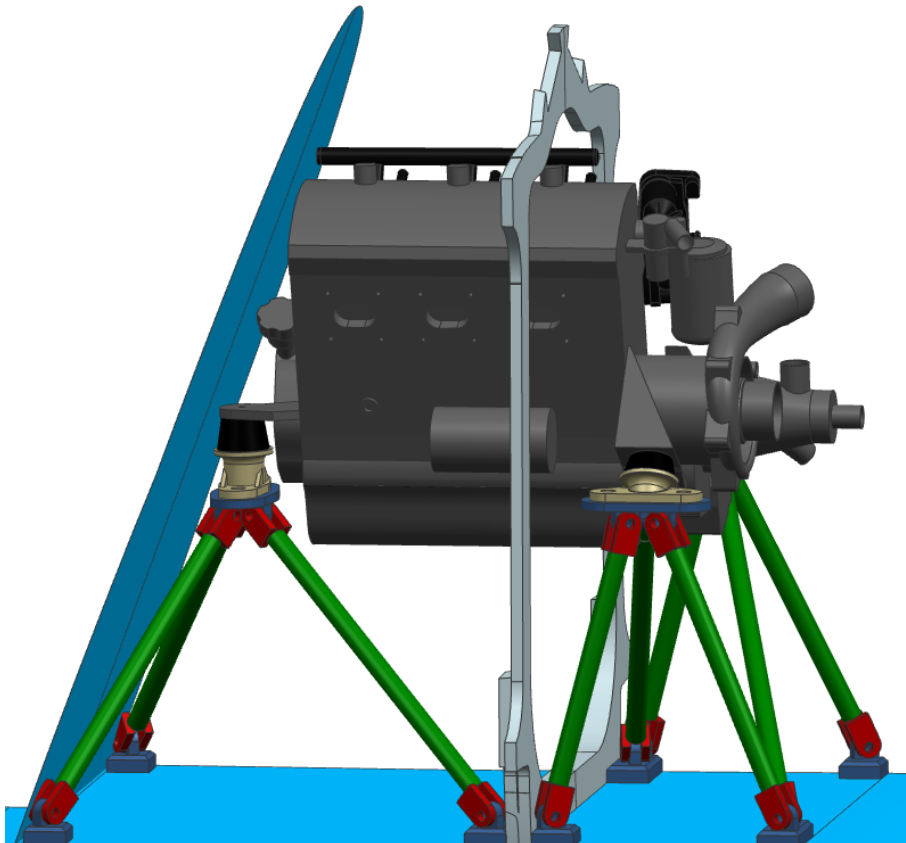
2.2.2 Motorové lože prutové (příhradové)

Tento typ lože je tvořen prostorovými ocelovými vzpěrami, spojenými se závěsy motoru. Větší počet vzpěr zajistí distribuci sil do více míst. Tím se sníží lokální zatížení konstrukce v místě závěsů. Vzpěry neboli táhla přenášejí pouze tahová a tlaková napětí. Uchycení táhel k motoru či draku je realizováno prostřednictvím spoje oko-čep-vidlice. Tento spoj je konstruován jako stavitelný, aby bylo umožněno nastavení osy motoru do potřebného směru. Zároveň nejsou kladeny tak vysoké požadavky na přesnost výroby. Naopak nevýhodou stavitelnosti konstrukce je problematické ustavování a nastavení správné předepjatosti většího počtu vzpěr. [6]

Samotný motor nebyl konstruován pro prutové lože. Jeho silentbloky jsou navrženy pro uložení na rovné ploše. Byly proto doplněno o protikusy s oky pro spojení s vidlicemi vzpěr. Geometrie táhel je uskupena tak, aby jejich osy procházeli průsečíkem v místě závěsu. Umístění trupových úchytů bylo voleno do míst s větší tuhostí (spoje přepážky, podlahy a potahu).

Při návrhu se vycházelo z pravidla o uložení motoru v prutovém loži. Tedy uchycení nejméně jednoho bodu motoru ve třech bodech a jednoho bodu motoru uchyceném do dvou bodů motorové přepážky. Takto navrhované lože by mělo dostatečně tlumit kmity generované nevyváženými hmotami a akcelerací motoru. [1]

Výhodou této koncepce je její relativně nižší hmotnost. Naopak prostorová dispozice motoru a ploché podstavy silentbloků neumožňují použití většího množství táhel a tím i výraznější distribuci zatížení, vyšší tuhost a bezpečnost při poruše konstrukce.



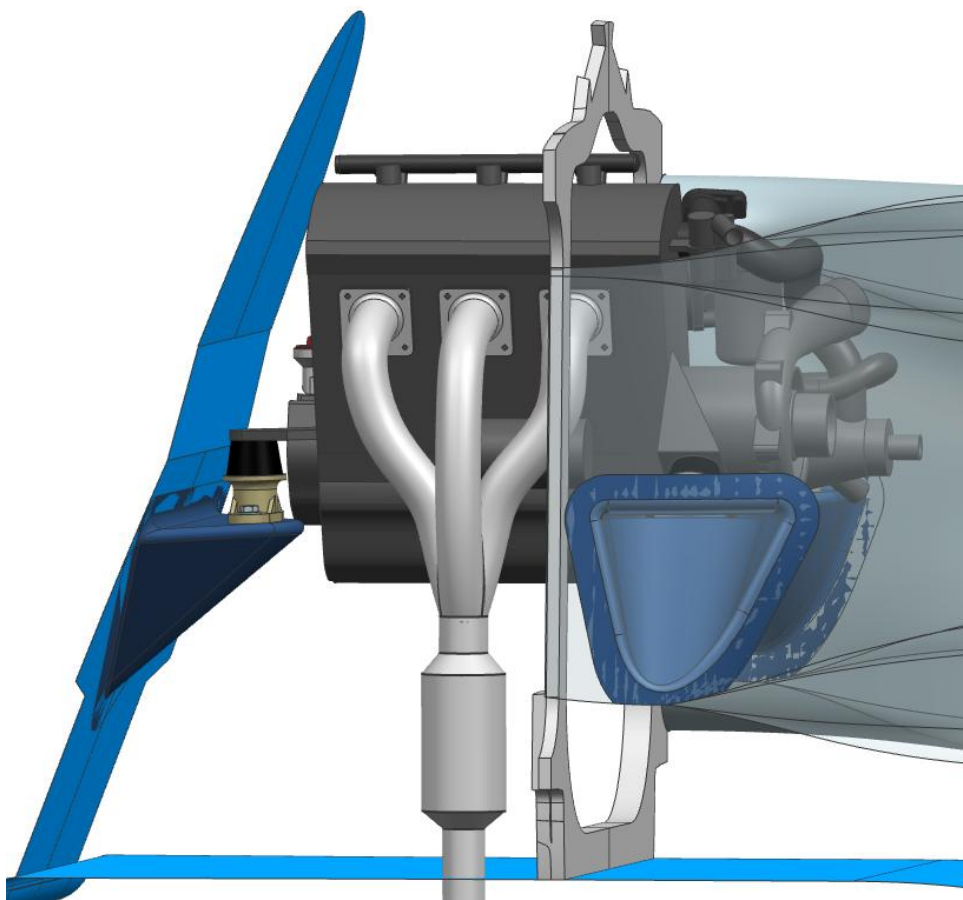
Obr. 11 Prutové lože

2.2.3 Uložení motoru na kompozitních podpěrách

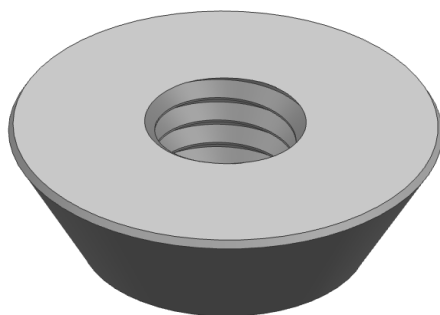
Tato varianta uložení motoru je tvořena třemi podpěrami, na jejichž rovné (kontaktní) plochy přímo dosedají silentbloky. Tyto podpěry jsou vyrobeny z kompozitního materiálu, který předurčuje výhodné mechanické vlastnosti. Mezi ně patří rozhodující nízká hmotnost a poměrně dobrá tuhost závěsu. Zároveň se jedná o výhodné řešení z hlediska prostorové zástavby a zatížení okolní konstrukce. Naopak nevýhodou této koncepce je minimální možnost stavitelnosti. Tělesa (základny) silentbloků jsou vybavena otvory pro šroubové spojení s podpěrami. Tyto otvory mají větší průměr než je průměr šroubu. Tedy umožňují určité horizontální nastavení. Vertikální stavění je pak v omezené míře možné docílit pomocí distančních podložek pod základny silentbloků. Aby bylo možné realizovat šroubové spojení, jsou dosedací plochy podpěr vybaveny duralovými vložkami (inserty) se závity (Obr. 13).

Závěsy jsou olemovány tak, aby mohly být přilepeny k okolní konstrukci (přední závěs k motorové prepážce a boční závěsy k sacím kanálům). Tento spoj bude značně namáhán na odlup, který je možné omezit následným přelaminováním. Okolní konstrukci (zejména sací kanály) bude pravděpodobně nutné vyztužit, aby byla schopna přenést dané zatížení.

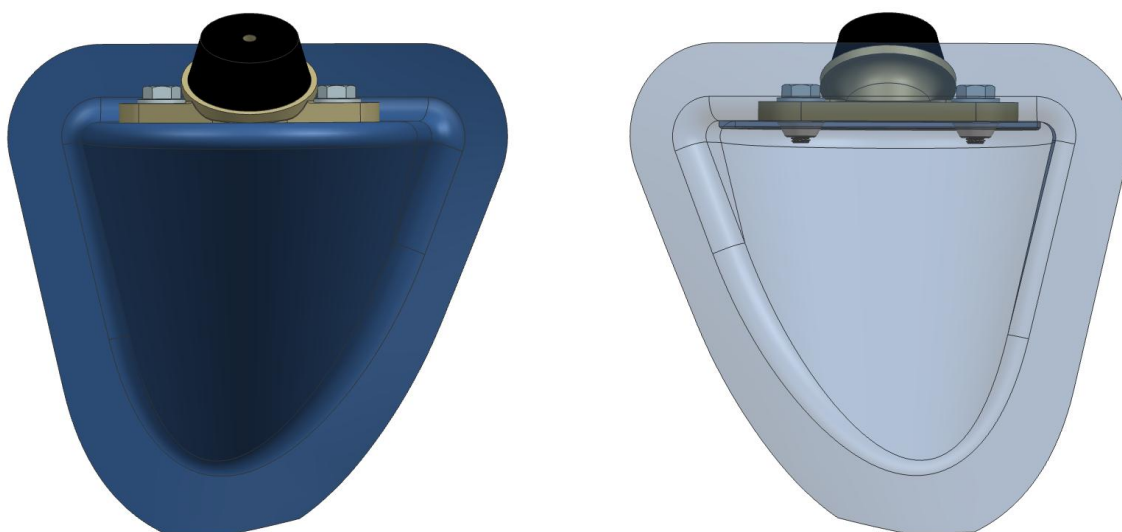
Po zvážení všech aspektů byla tato varianta uložení motoru zvolena jako nejvhodnější a bude tedy dále rozpracována. Materiály a skladba kompozitu budou definovány a optimalizovány v rámci pevnostní analýzy podpěr (kap. 3.4.2).



Obr. 12 Uložení na kompozitních podpěrách



Obr. 13 Závěťová vložka (M8)



Obr. 14 Uložení silentbloku na podpěře

2.3 Konstrukční úpravy motoru a jeho systémů

Motor Rotax 1503 a jeho systémy jsou primárně navrženy pro aplikaci ve vodních skútrech. Tedy některá konstrukční řešení nejsou příliš vhodná pro leteckou aplikaci a vyžadují úpravy. V následující části budou navrženy modifikace některých soustav (vyjma palivové a elektrické) v souladu se stavebnými předpisy UL-2 a CS-VLA. Především bude brán zřetel na zjednodušování soustav a tedy snižování hmotnosti při zachování dané úrovně spolehlivosti.

2.3.1 Sání motoru

V navržené soustavě sání není využit vstupní tlumič a přívodní hadice, které jsou značně náročné na zastavěný prostor. Vzduch je nasáván přes filtr umístěný přímo na kompresoru. Filtr zamezuje nasátí nečistot do soustavy. Stlačený vzduch je veden hadicemi do intercooleru, kde se ochladí nikoliv o chladicí vodu, ale o okolní vzduch (viz Obr. 17). Dále je veden zpět přes škrtecí klapku do airboxu, ze kterého je vyjmut původní filtr.

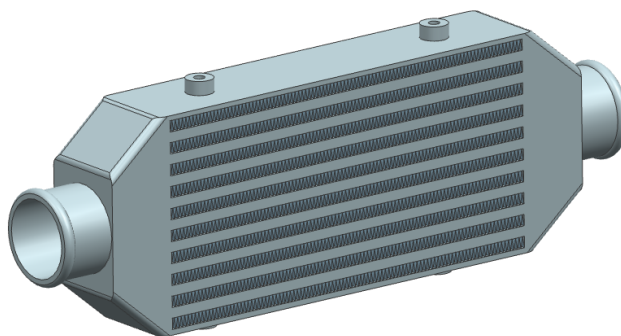
Umístění mezichladiče je zvoleno ve spodní části motorového prostoru poblíž přepážky, ke které může být upevněn. Zároveň je zde dostatek prostoru pro vedení poměrně objemných hadic, aniž by došlo k jejich deformaci. Hadice mohou být vyrobeny jako gumové (problematická malosériová výroba) případně kompozitní.

Vybraný vzduchový filtr [7] a mezichladič [8] jsou volně dostupné na trhu. Při jejich výběru se vycházelo z výkonnostních parametrů motoru. Zároveň byl brán ohled na jejich minimální rozměry a hmotnost.

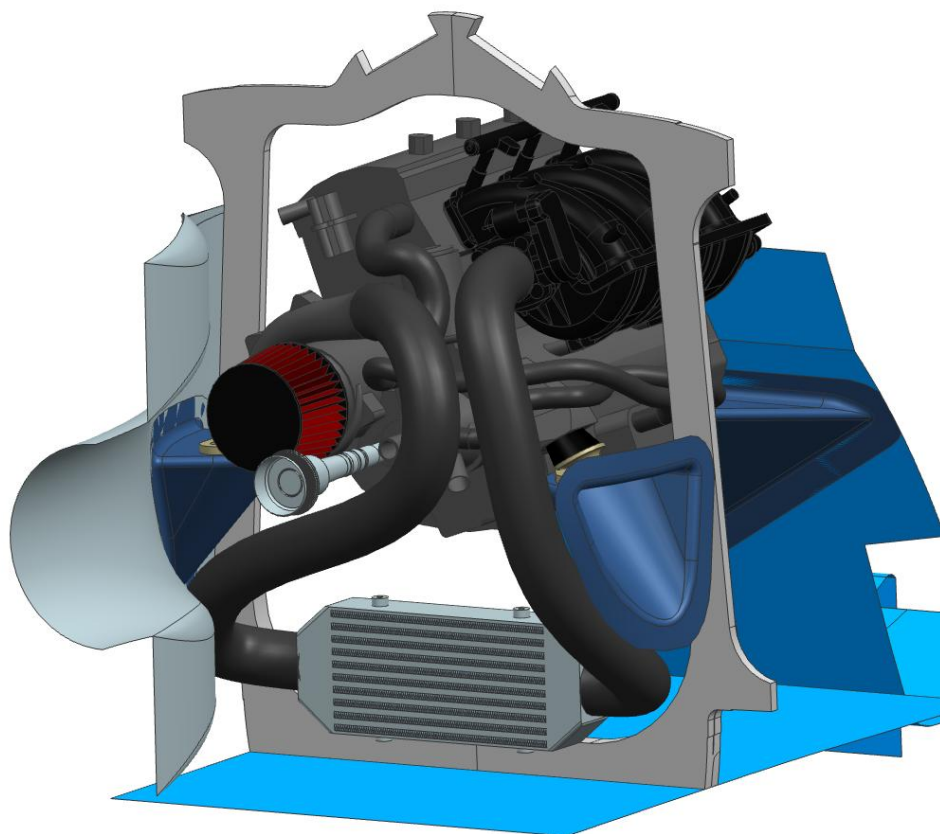
Výhodou tohoto typu mezichladiče (vzduch-vzduch) je nižší hmotnost oproti původnímu (voda-vzduch). Na druhé straně podle zprávy [4] zvolený druh intercooleru vykazuje nižší účinnost, a tedy ovlivňuje výsledné výkonové charakteristiky motoru.



Obr. 15 Vzduchový filtr KN RU-3103 HBK



Obr. 16 Intercooler



Obr. 17 Soustava sání

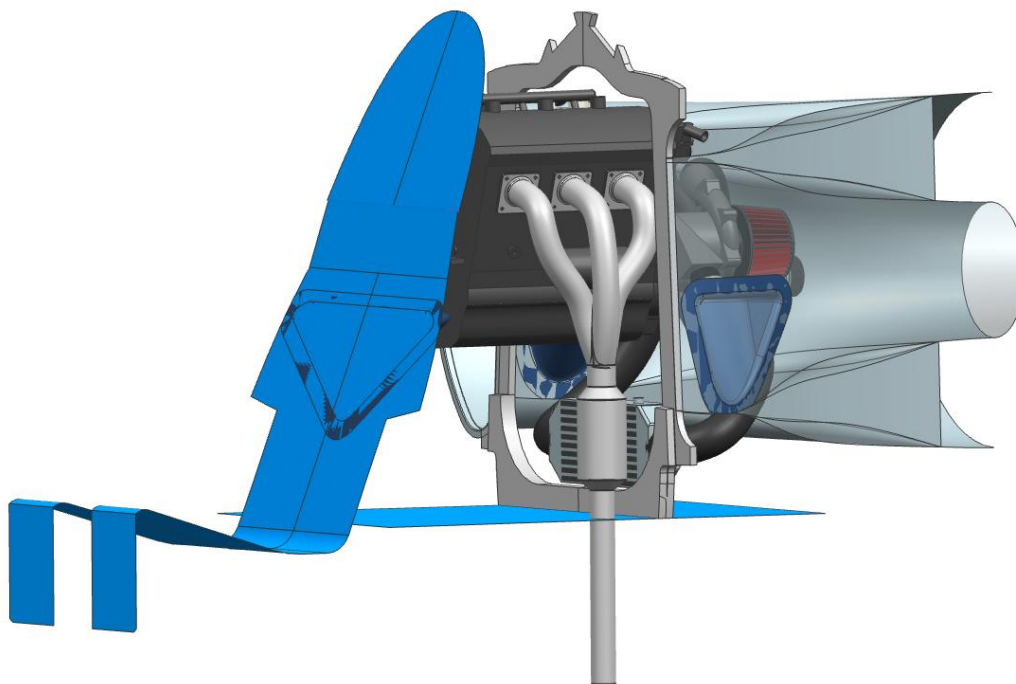
2.3.2 Výfuková soustava

Navržený výfukový systém (viz Obr. 18) zcela nahrazuje ten původní. Je tvořen jednoduchou soustavou tří trubek spojených v jedinou s větším průměrem, jež co nejrychleji odvádí spaliny mimo drak letounu. Soustava bude značně tepelně namáhána, neboť se neuvažuje s vodním chlazením. Z toho důvodu bude pravděpodobně potřebná izolace v blízkosti potrubí tak, aby se snížilo tepelné ovlivnění okolní konstrukce a ohřev chladícího vzduchu intercooleru.

Na výfukové svody by mohl být použit materiál inconel. Jedná se o nerezovou slitinu niklu, chromu, železa a případně Co, Mo, Ni. Tento materiál vykazuje dobrou svařitelnost a tvárnost v žíhaném stavu. Rovněž vyniká svoji nízkou hmotností.

Součástí výfukového potrubí je tlumič, který snižuje hlukovou zátěž. Může být rovněž využit jako výměník tepla pro vytápění kabiny letounu.

Výfuková soustava nebyla žádným způsobem optimalizována pro použitý motor Rotax 1503. Cílem návrhu systému bylo odhadnout jeho hmotnost a zastavěný prostor.



Obr. 18 Výfuková soustava

2.3.3 Chladicí soustava

Aplikace otevřeného okruhu chladicí soustavy (chlazení intercooleru a výfuku) již z principu není uvažována. Navržené změny uzavřeného okruhu chlazení se dotkly zejména chladiče a přívodních hadic. Původní chladič (voda – chladicí kapalina) byl nahrazen vzduchovým a zároveň došlo k uspořádání hadic v závislosti na umístění výměníku ve výstupním kanálu.

V systému je použit hliníkový chladič z motocyklu Yamaha R1 (2009-2011), který je vybaven plnicím hrdlem s tlakovým uzávěrem (otevírací tlak – 1,1 kPa). Uzávěr je tvořen přetlakovým a podtlakovým ventilem, jehož účelem je redukce tlaku v systému. Při ohřátí chladicí kapaliny vzniká v soustavě přetlak, který zvyšuje bod varu kapaliny. Tím se zvyšuje účinnost motoru a zároveň se umožňuje jeho provoz ve vyšších nadmořských výškách. Při ohřevu se z chladicí kapaliny uvolňují výpary, které se mohou přes ventil protlačit ze systému. Po ochlazení kapaliny je přes podtlakový ventil nasán vzduch, který vyrovná tlak systému s okolím. Tím se zamezí deformace stěn chladiče. [9]

V chladicí soustavě motoru je ponechána původní expanzní nádobka, která je také vybavena tlakovým uzávěrem (otevírací tlak – 0,9 kPa). Z toho důvodu bude plnicí hrdlo chladiče zaslepeno, aby soustavu řídil pouze jeden redukční tlakový prvek.

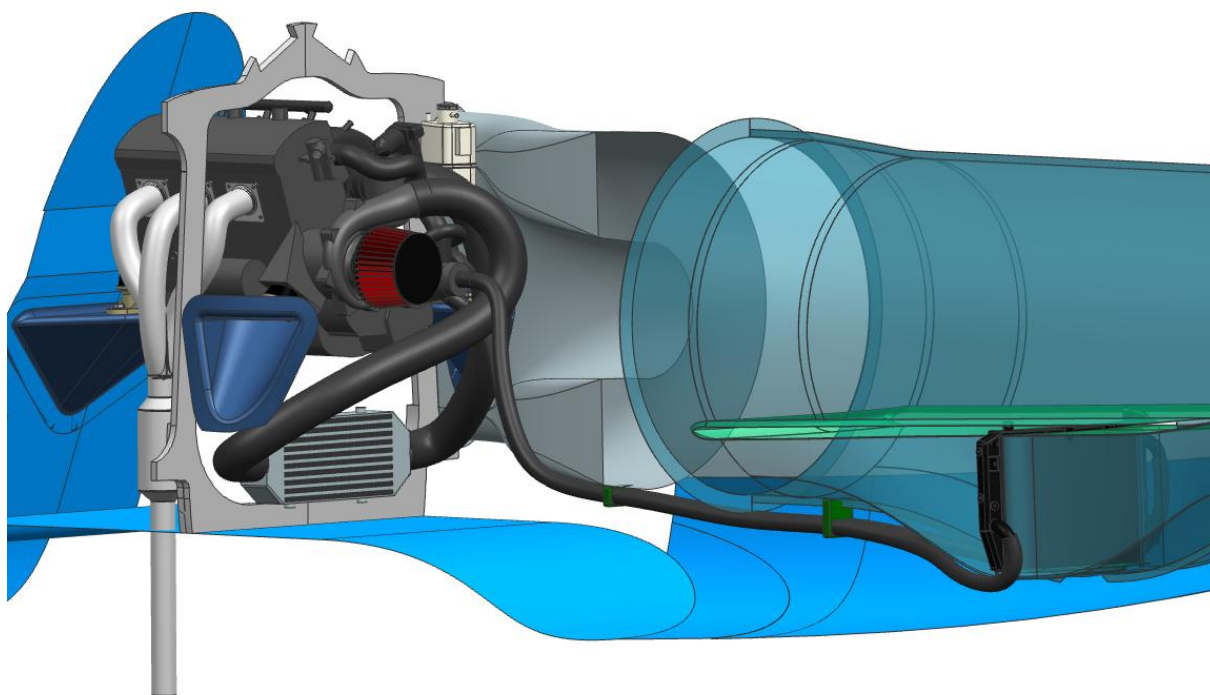
Součástí motocyklového chladiče jsou čtyři výstupy. Dva dominantní slouží pro přívod/odvod kapaliny z primárního chladicího okruhu. Na třetí vstup je připojena hadice ze sekundárního (malého) okruhu. Přes čtvrtý výstup, umístěný na plnicím hrdle, se odvádí přebytečná chladicí kapalina a vzduch zpět do expanzní nádoby. Z těchto výstupů budou využity pouze dva hlavní, zbylé budou zaslepeny.

Hadice jsou vedeny k výměníku nejkratší možnou cestou s minimálními průhyby, aby se co nejvíce omezila jejich hmotnost. Přívodní hadice od čerpadla je napojena na spodní vstup, zpětná pak na horní výstup chladiče. Tato koncepce je volena z důvodu snazšího odvzdušnění systému.

Průměry výstupů vodního čerpadla a chladiče nejsou shodné. Z tohoto důvodu jsou v soustavě použity redukční prvky, které umožní spojení obou členů hadicemi o konstantním průměru. Výsledný průměr hadice je určen rozměrem výstupů chladiče (menší průměr) tak, aby se redukovala hmotnost. Tento typ hadic je volně dostupný na trhu.



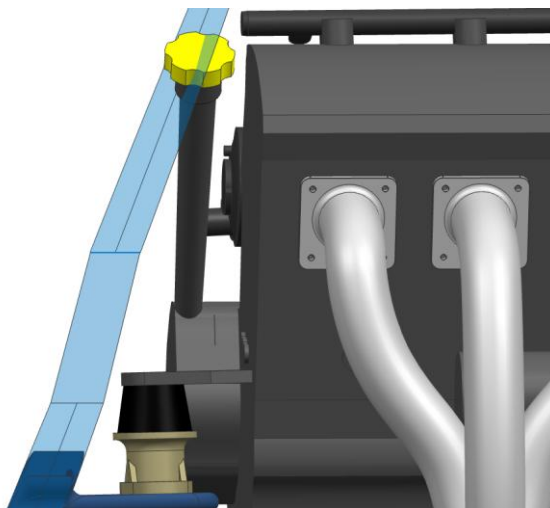
Obr. 19 Chladič motocyklu Yamaha R1 (2009-2011)



Obr. 20 Spojení chladiče s vodním čerpadlem

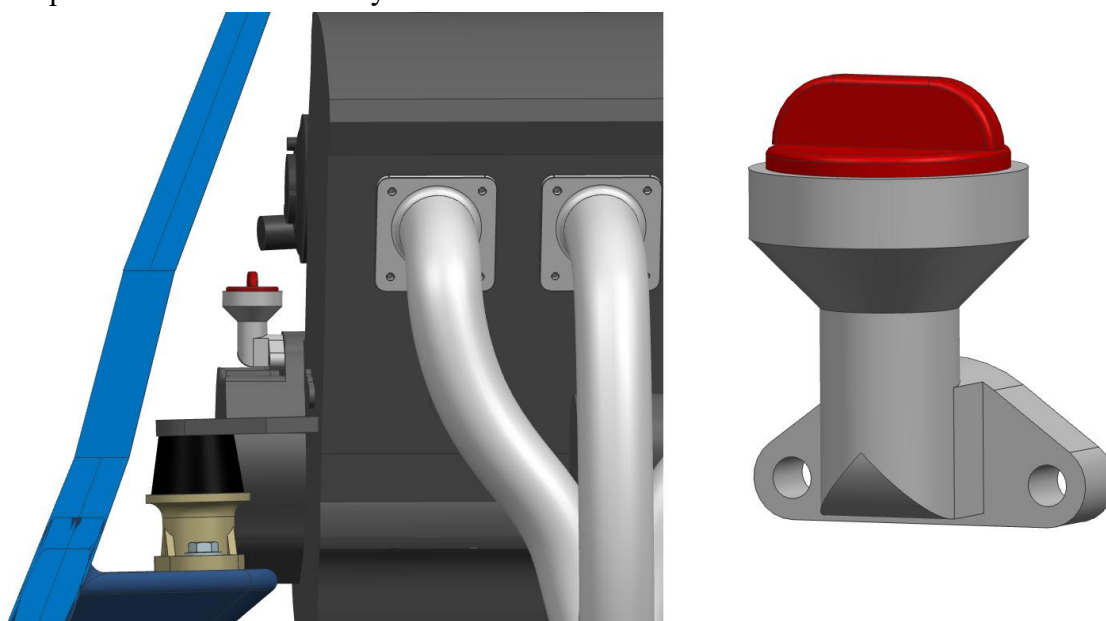
2.3.4 Mazací soustava

System mazání motoru plně vyhovuje požadavkům stavebních předpisů, a tedy není nutné provádět významné modifikace. Navržené úpravy se dotkly pouze plnicího hrdla olejové soustavy. To původní bylo zcela nahrazeno novým, neboť kolidovalo s přední motorovou přepážkou (viz obr. 21)



Obr. 21 Plnicí hrdlo - originál

Navržené plnicí hrdlo je upraveno tak, aby umožnilo snadné doplnění oleje přes montážní otvor pod řezačem mezní vrstvy.



Obr. 22 Navržené plnicí hrdlo

2.3.5 Motorové komponenty

Samotný pohonný agregát nevyžaduje významné úpravy, které by podmiňovaly leteckou aplikaci. Avšak na trhu je dostupná široká škála dílů od výrobců, kteří se zabývají úpravou tohoto typu motoru. Jedná se o komponenty, které snižují celkovou hmotnost a zároveň zvyšují výkonnostní parametry motoru. Nevýhodou je jejich poměrně vysoká cena. V následující části budou uvedeny komponenty, které výrazně zvyšují výkon motoru.

Kompresor

Přepřehování přispívá významnou měrou k celkovému výkonu motoru. Kompresor ET 70-145 zvyšuje plnicí tlak o 18-20 psi (124-138 kPa) oproti sériovému 9,5 psi (65 kPa) díky většímu průměru radiálního kola. [10]



Obr. 23 Kompresor ET 70-145; Zdroj: PWC Performance Store [11]

Airbox

Možnou úpravou sacího okruhu je použití hliníkových sacích potrubí od společnosti Wilson Manifolds (viz Obr. 24). Oproti originálnímu plastovému potrubí tento typ podle výrobce zlepšuje průtok vzduchu a tím i výkon motoru. Měl by vykazovat vyšší spolehlivost a stabilitu při vyšším přetlaku. [11]



Obr. 24 Hliníkové sací potrubí; Zdroj: PWC Performance Store [11]

Ojnice

Společnost Carrillo nabízí odlehčené ojnice, které by měly zvýšit výkon a spolehlivost motoru. Jedná se o výkovky z vysokopevnostní slitiny navržené pro výkon motoru přesahující 500 HP. Jejich předností je nižší hmotnost (celkem $3 \times 168 = 504$ g) a vyšší pevnost oproti originálnímu dílu. To se projeví na rychlejším roztočení motoru a delším setrvání ve vyšších otáčkách. [11]



Obr. 25 Ojnice; Zdroj: PWC Performance Store [11]

Vačková hřídel

Upravená vačková hřídel, vyrobená z oceli AISI 8620, vykazuje nižší hmotnost a vyšší pevnost oproti sériové. Umožňuje nárůst max. otáček až o 250-300 a zvýšení špičkového výkonu o 20 HP. [10]



Obr. 26 Vačková hřídel; Zdroj: PWC Performance Store [11]

Odlehčený setrvačník a ozubené kolo vačkové hřídele

Odlehčené rotační komponenty se díky nižšímu momentu setrvačnosti snadněji roztáčejí, což napomáhá k rychlejšímu vytáčení motoru.

Upravený setrvačník od firmy Rotax je lehčí oproti originálu o 460 g, kolo vačkové hřídele pak o 59 g. [11]



Obr. 27 Setrvačník
Zdroj: PWC Performance Store [11]



Obr. 28 Ozub. kolo vačkové hřídele
Zdroj: PWC Performance Store [11]

Upravené ventily saní a výfuku

Upravené ventily vykazují vyšší pevnost a nižší hmotnost oproti originálním. Sací ventil má hmotnost 42 g a výfukový 40 g. Upravená geometrie hlav ventilu zlepšuje průtok směsi/spalin. Sací ventily jsou vyrobeny z nerezové oceli, odolávající korozi, výfukové pak z inconelu, odolávající vysokým teplotám. Stopky ventilu jsou chromované. [11]



Obr. 29 Sací a výfukový ventil;
Zdroj: PWC Performance Store [11]

3. Pevnostní kontrola motorového lože

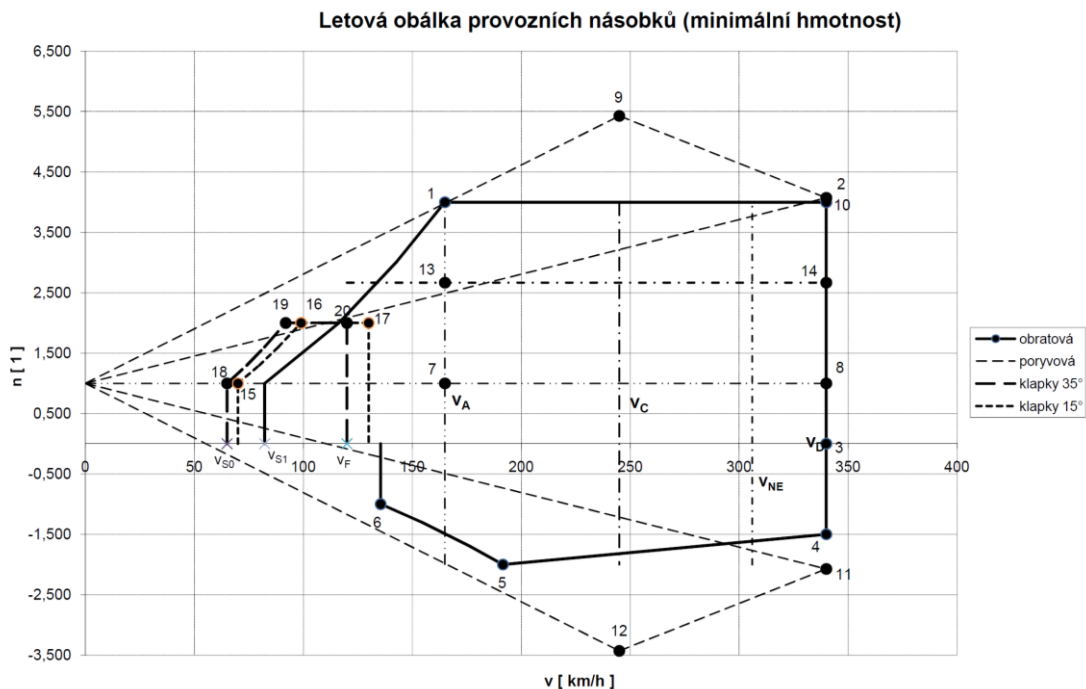
3.1 Požadavky stavebních předpisů

Uložení motoru a jeho zástavba do draku letounu je navrhována v souladu se stavebními předpisy UL-2 [12] a CS-VLA [13]. V této části se stanoví zatížení motorového lože, které bude podkladem pro následnou pevnostní kontrolu. Toto zatížení vychází ze stavebních předpisů, kde jsou stanoveny požadavky na pevnost konstrukce. Ty jsou vyjádřeny formou provozního a početního zatížení, které bude dále popsáno.

Provozní zatížení

Provozní zatížení je nejvyšší zatížení, které je během provozu očekáváno. Při tomto aplikovaném zatížení se nesmí konstrukce trvale deformovat. Případně nemohou vznikat takové deformace konstrukce, jež by omezily bezpečný provoz. Provozní zatížení je podle stavebních předpisů určeno obálkou provozních násobků. Předpisy vyžadují splnění požadavků na pevnost konstrukce při režimech letu na hranici a uvnitř obálky. [12]

Obálka provozních násobků letounu UL-39 (minimální vzletová hmotnost), vycházející ze stavebních předpisů, je zobrazena na Obr 30.



Obr. 30 Obálka provozních násobků (min. hmotnost); Autor: Brabec, Jiří. ULT FS ČVUT

Početní zatížení

Početní (mezní) zatížení je provozní zatížení vynásobené příslušným součinitelem bezpečnosti. V konstrukci, zatížené po dobu nejméně 3 sekund na početní zatížení, nesmí dojít k poruše (časový limit neplatí pro dynamicky namáhané konstrukce). Při pevnostní kontrole bude motorové lože zatíženo právě početním zatížením, neboť bude ověřováno, zda nedojde k porušení kompozitní konstrukce.

Součinitel bezpečnosti neboli bezpečnostní násobek je v případě kompozitních konstrukcí tvořen základním násobkem (1,5) a rozšiřujícím součinitelem (1,5). Tento součinitel

zohledňuje nejistotu ve výrobě nebo v kontrole kompozitních konstrukcí. [13] Výsledný součinitel je pak roven:

$$f = 1,5 \cdot 1,5 = 2,25 \quad (1)$$

3.1.1 Případy zatížení podle předpisů UL – 2 a CS – VLA

Stavební předpisy stanovují případy zatížení, na která musí být motorové lože navrženo. Výklad obou předpisů je v této části velmi podobný. Některé odchylky budou uvedeny.

a) Zatížení motorového lože

1. Provozním krouticím momentem při vzletovém výkonu motoru v kombinaci se 75% provozním zatížením v bodě 1 obálky obrátů ($n = 4$).
2. Provozním krouticím momentem při max. trvalém výkonu motoru v kombinaci s provozním zatížením v bodě obálky 1. Obdobným způsobem bude počítáno zatížení i v ostatních bodech obálky.

Velikost provozního krouticího momentu se vypočte vynásobením středního (průměrného) krouticího momentu při vzletovém nebo maximálním trvalém výkonu motoru příslušným koeficientem. Pro čtyřdobé triválcové motory je koeficient roven 3. [12]

b) Zatížení v bočním směru

Bočná síla se vypočte podle vztahu

$$F_Y = n_b \cdot m_{eng} \cdot g \quad (2)$$

kde n_b [–] je obrátový (provozní) násobek zatížení v bočním směru, m_{eng} [kg] je hmotnost motoru včetně příslušenství a g [$m \cdot s^{-2}$] je tíhové zrychlení

Podle předpisu UL – 2 je n_b roven jedné třetině provozního násobku v bodě 1 obálky obrátů. Podle předpisu CS – VLA je n_b roven hodnotě 1,33.

c) Zatížení při nouzovém přistání

Je-li pohonná jednotka umístěna za kabinou posádky, pak musí být její uložení navrženo na dopředný havarijní (početní) násobek o velikosti 15 (CS-VLA) případně 9 (UL-2).

Dále pak předpisy stanovují zrychlení při nouzovém přistání, na která musí být motorové lože navrženo. Velikosti početního zrychlení jsou vzaty z předpisu UL-2, který stanovuje vyšší hodnoty než předpis CS-VLA.

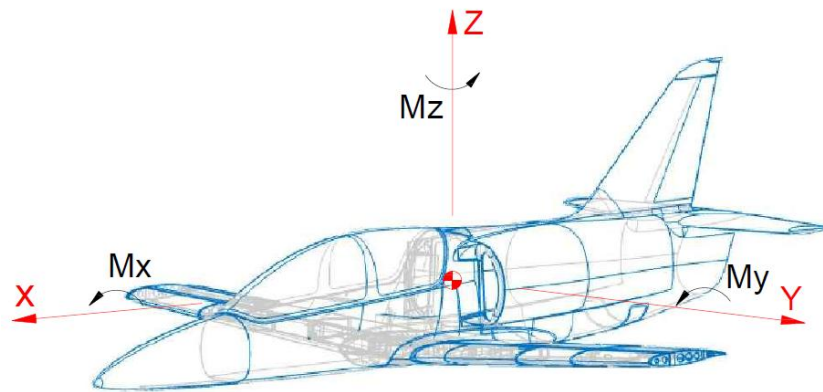
Tab. 3 Havarijní násobky dle předpisu UL-2

Směr zrychlení	Velikost
Nahoru	4,5g
Do stran	3,0g
Dolů	4,5g

3.2 Stanovení zatížení motorového lože

3.2.1 Souřadný systém letounu

Zavedení souřadného systému letadla je výhodné pro následující stanovení zatížení a výpočet reakcí motorového lože. Souřadná osa X je rovnoběžná s podélnou osou trupu. Počátek souřadnic je zvolen v těžišti motoru.



Obr. 31 Schéma souřadného systému letadla včetně kladných smyslů momentů

3.2.2 Zatížení motorového lože

V následujících výpočtech motorového lože bude uvažováno zatížení vlivem:

- a) Setrvačné síly
- b) Krouticího momentu motoru

Tah dmychadla se vlivem konstrukčního uspořádání transmisní hřídele na motorové lože nepřenáší. Rovněž nebudou do výpočtu zaneseny gyroskopické momenty ventilátoru a vibrace generované pohonnou jednotkou, neboť jejich přínos k celkovému zatížení je zanedbatelný. [14]

a) Setrvačné síly

Setrvačné síly působící na motor se odvíjejí od velikosti letového násobku. Největší hodnoty tak dosahují při maximálních provozních, nebo při havarijních násobcích, která jsou stanovena předpisem. Velikost setrvačné síly se stanoví podle následujícího vztahu:

$$F = n \cdot m_{eng} \cdot g \quad (3)$$

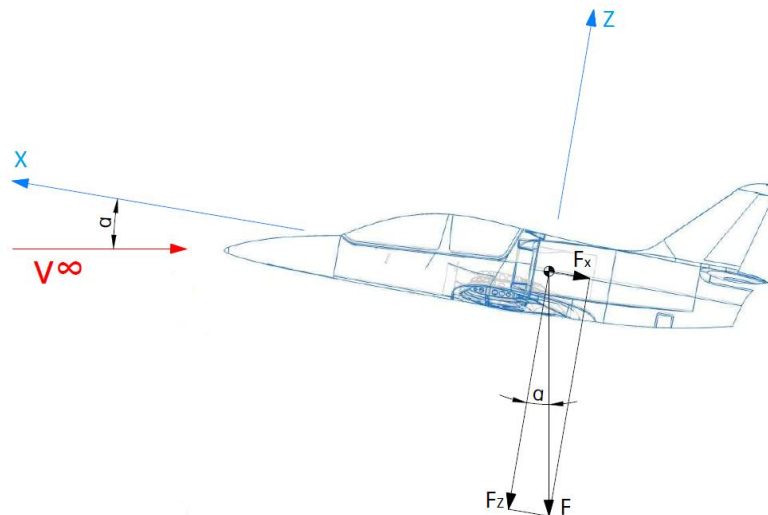
kde $n [-]$ je provozní násobek

Hmotnost motoru a některých dílů příslušenství vychází z hmotnostní analýzy, která je uvedena ve zprávě TPZ/ULT/35/2014 [15]. Dále pak byly stanoveny hmotnosti dodatečných dílů fyzickým zvážením nebo výpočtem v programu NX 8.5. Celková hmotnost motoru včetně příslušenství tak činí 98,6 kg. Hmotnosti jednotlivých dílů a poloha těžiště jsou uvedeny v části Hmotový rozbor (kap 4.).

Setrvačná síla je dále rozložena na jednotlivé složky ve směru souřadných os X a Z podle vztahů:

$$\begin{aligned} F_x &= F \cdot \sin \alpha \\ F_z &= F \cdot \cos \alpha \end{aligned} \quad (4)$$

kde α [°] je úhel mezi podélnou osou trupu a směrem nabíhajícího proudu vzduchu (viz Obr. 32)



Obr. 32 Rozklad setrvačné síly F na složky F_x a F_z v souřadném s. letadla

b) Kroučící moment motoru

Kroučící moment na výstupní hřídeli je zachycen v uložení motoru. Jeho velikost je dána následujícím vztahem.

$$M_k = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot \frac{n_{\text{mot}}}{60}} \quad (5)$$

kde P [W] je výkon a n_{mot} [ot/min] otáčky motoru

3.2.3 Numerický výpočet zatížení

Podle uvedených vztahů budou vypočteny velikosti provozních a havarijních zatížení odpovídající jednotlivým předpisovým případům.

Ad 3.1.1 a) 1.

Vzletový výkon je uvažovaný výkon motoru při max. otáčkách (8000 ot/min). Predikovaná hodnota tohoto výkonu motoru v režimu sport se vzduchovým mezichladičem je 181600 W (viz Tab. 2).

$$M_k = 3 \cdot \frac{P_{\text{max.vzlet}}}{2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60}} = 3 \cdot \frac{181600}{2 \cdot \pi \cdot \frac{8000}{60}} = 650,307 \text{ Nm} \quad (6)$$

$$F = -0,75 \cdot n \cdot m_{\text{eng}} \cdot g = -0,75 \cdot 4 \cdot 98,6 \cdot 9,81 = -2901,798 \text{ N} \quad (7)$$

Ad 3.1.1 a) 2.

Max. trvalý výkon je uvažovaný výkon motoru při 75% max. otáček (8000 ot/min), tedy při 6000 ot/min. Predikovaná hodnota tohoto výkonu je 117 800 W. [4]

$$M_k = 3 \cdot \frac{P_{\max.\text{trval}}}{2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60}} = 3 \cdot \frac{117800}{2 \cdot \pi \cdot \frac{6000}{60}} = 562,454 \text{ Nm} \quad (8)$$

$$F = -n \cdot m_{\text{eng}} \cdot g = -4 \cdot 98,6 \cdot 9,81 = -3869,064 \text{ N} \quad (9)$$

Obdobně budou stanovena provozní zatížení v ostatních bodech obálky odpovídající minimální a maximální vzletové hmotnosti letounu.

Ad 3.1.1 b) Boční zatížení

$$\begin{aligned} \text{UL-2: } F_Y &= n_b \cdot m_{\text{eng}} \cdot g = \frac{1}{3} \cdot 4 \cdot 98,6 \cdot 9,81 = 1289,688 \text{ N} \\ \text{CS-VLA: } F_Y &= n_b \cdot m_{\text{eng}} \cdot g = 1,33 \cdot 98,6 \cdot 9,81 = 1286,464 \text{ N} \end{aligned} \quad (10)$$

Ad 3.1.1 c) Zatížení při nouzovém přistání

Výpočet zatížení v dopředném směru:

$$\begin{aligned} \text{UL-2: } F_X &= n_H \cdot m_{\text{eng}} \cdot g = 9 \cdot 98,6 \cdot 9,81 = 8705,394 \text{ N} \\ \text{CS-VLA: } F_X &= n_H \cdot m_{\text{eng}} \cdot g = 15 \cdot 98,6 \cdot 9,81 = 14508,997 \text{ N} \end{aligned} \quad (11)$$

Vypočtená provozní zatížení byla následně vynásobena součinitelem bezpečnosti. Tím se stanovila početní zatížení motorového lože, která spolu s havarijním zatížením byla přepočítána do souřadného systému letadla a uvedena v následujících tabulkách.

Dále pak byla vybrána a očíslována zatížení, která budou podkladem pro výpočet reakcí a pevnostní kontrolu uložení motoru.

Tab. 4 Početní zatížení – minimální hmotnost letounu

Zatížení	n	α	F	Fz	Fx	Fy	Mk	Číslo
	[-]	[°]	[N]	[N]	[N]	[N]	[Nm]	[-]
Bod obálky	1	4,0	10,3	-6529,0	-6424,6	-1163,2	1463,2	1
	1	4,0	10,3	-8705,4	-8566,1	-1550,9	1265,5	2
	2	4,0	-0,2	-8705,4	-8705,4	24,5	1265,5	
	3	0,0	-3,4	0,0	0,0	0,0	1265,5	
	4	-1,5	-4,6	3264,5	3254,1	-260,5	1265,5	
	5	-2,0	-10,0	4352,7	4286,3	-757,2	1265,5	
	6	-1,0	-10,0	2176,3	2143,2	-378,6	1265,5	
	7	1,0	0,0	-2176,3	-2176,3	-1,4	1265,5	
	8	1,0	-2,6	-2176,3	-2174,2	97,6	1265,5	
	9	5,4	5,0	-11816,4	-11771,0	-1034,4	1265,5	3
	10	4,1	-0,1	-8865,3	-8865,3	15,8	1265,5	
	11	-2,1	-5,0	4512,6	4495,2	-396,2	1265,5	
12	-3,4	-8,7	7463,7	7378,3	-1125,6	1265,5	4	

Tab. 5 Početní zatížení - maximální hmotnost letounu

Zatížení		n [-]	α [°]	F [N]	Fz [N]	Fx [N]	Fy [N]	Mk [Nm]	Číslo [-]
Bod obálky	1	4,0	16,6	-6529,0	-6257,7	-1862,6		1463,2	5
	1	4,0	16,6	-8705,4	-8343,7	-2483,4		1265,5	6
	2	4,0	1,3	-8705,4	-8703,1	-201,4		1265,5	
	3	0,0	-3,4	0,0	0,0	0,0		1265,5	
	4	-1,5	-5,1	3264,5	3251,4	-292,1		1265,5	
	5	-2,0	-13,1	4352,7	4239,5	-986,2		1265,5	
	6	-1,0	-13,1	2176,3	2119,8	-493,1		1265,5	
	7	1,0	1,6	-2176,3	-2175,5	-61,3		1265,5	
	8	1,0	-2,2	-2176,3	-2174,7	83,5		1265,5	
	9	4,5	6,8	-9829,9	-9759,8	-1171,4		1265,5	
	10	3,4	0,7	-7486,9	-7486,4	-87,3		1265,5	
	11	-1,4	-5,1	3134,2	3122,0	-276,6		1265,5	
12	-2,5	-9,1	5477,2	5408,8	-862,9		1265,5		

Tab. 6 Boční a havarijní zatížení

Zatížení		n [-]	α [°]	F [N]	Fz [N]	Fx [N]	Fy [N]	Mk [Nm]	Číslo [-]
Boční zatížení	UL-2	1,333					2901,8		7
	CS-VLA	1,33					2894,5		
Havarijní zatížení	UL-2	9				8705,4			8
	CS-VLA	15				14509,0			
	UL-2	4,5			4352,7		2901,8		9
	UL-2	3					-2901,8		
	UL-2	-3							
UL-2	-4,5				-4352,7				

3.3 Výpočet reakcí motorového lože

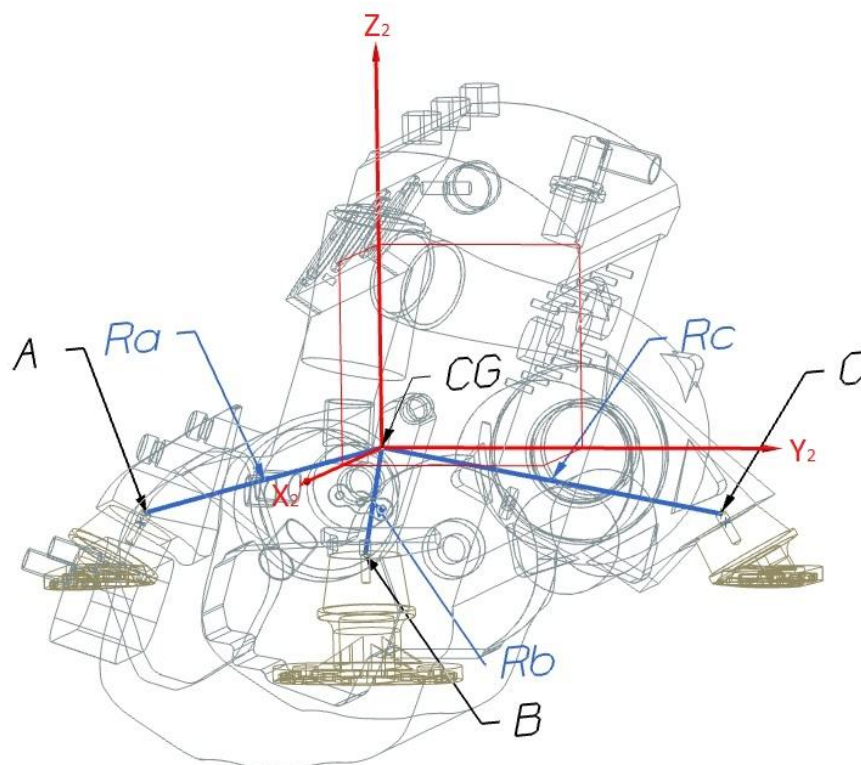
Znalost velikosti reakcí motorového lože je rozhodující pro jeho správné navržení. Proto je samotnému výpočtu v této práci věnována větší pozornost. Na jediném případě zatížení motoru bude použito několik způsobů výpočtu reakcí. Nejprve budou reakční síly stanoveny analyticky a poté přijde na řadu výpočet metodou konečných prvků. Následně budou porovnány výsledky a zvolen optimální způsob výpočtu. Ten bude využit ke stanovení reakcí od ostatních případů zatížení.

3.3.1 Souřadný systém motoru

Souřadný systém motoru (CG, X_2, Y_2, Z_2) je znázorněn na následujícím obrázku. Počátek souřadnic je zvolen v těžišti motoru (CG), které bylo vypočteno na základě měření úhlů mezi referenčními body při zavěšování motoru v definovaných bodech. [2]

Motor je podepřen ve třech závěsích (bodech) označených dle obrázku A, B a C. Spojnice jednotlivých bodů závěsů s počátkem souřadnic jsou značeny R_a, R_b a R_c .

Zvolený souřadný systém motoru pro výpočet reakcí tvoří osa X_2 , která je rovnoběžná s osou kroutičního momentu na výstupní hřídeli a zároveň je rovnoběžná s osou X souřadného systému letounu. Osu Y_2 určuje spojnice vedená z bodu A do bodu C a osa Z_2 je kolmá na rovinu X_2Y_2 (pravotočivý souřadný systém).

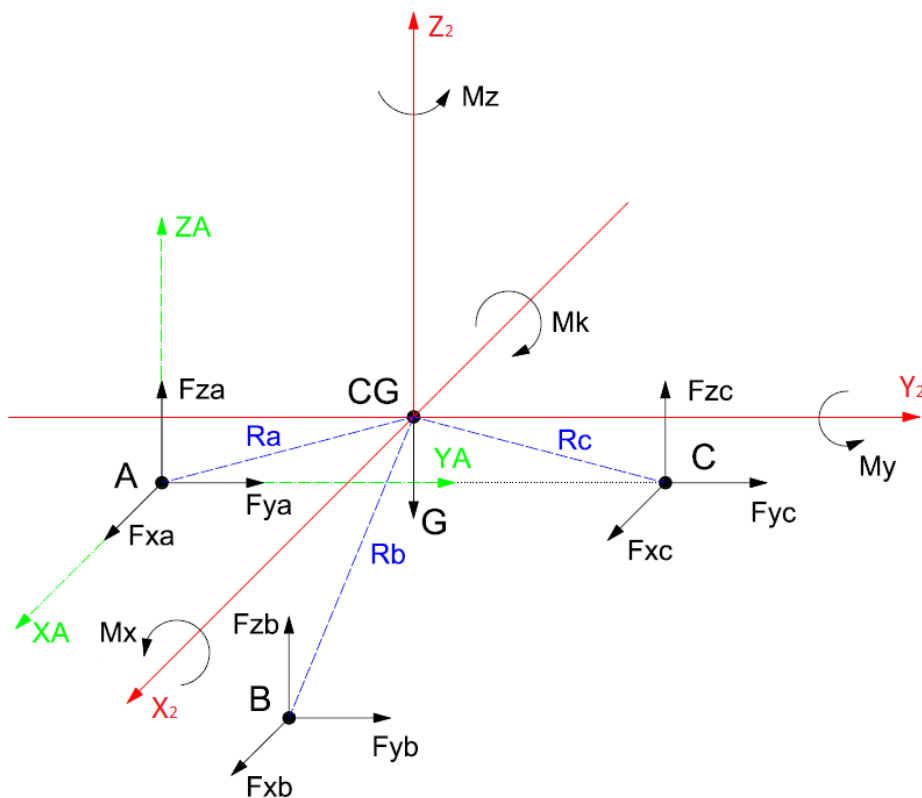


Obr. 33 Souřadný systém motoru

3.3.2 Analytický výpočet

V rámci analytického výpočtu byl model motoru zjednodušen a nahrazen absolutně tuhými prvky (spojnicemi) Ra, Rb a Rc. Tyto prvky osově přenášejí zatížení od tíhy a krouticího momentu motoru do jednotlivých závěsů, kde vzniká odpovídající reakce v příslušném směru.

3.3.2.1 Rovnice rovnováhy



Obr. 34 Zatížení od tíhy a krouticího momentu motoru

Silová rovnováha v jednotlivých směrech:

$$X_2: \sum_{i=1}^3 F_{Xi} = 0 \rightarrow F_{XA} + F_{XB} + F_{XC} = 0 \quad (12)$$

$$Y_2: \sum_{i=1}^3 F_{Yi} = 0 \rightarrow F_{YA} + F_{YB} + F_{YC} = 0 \quad (13)$$

$$Z_2: \sum_{i=1}^3 F_{Zi} = 0 \rightarrow F_{ZA} + F_{ZB} + F_{ZC} = G \quad (14)$$

Momentová rovnováha kolem bodu A

$$M_{XA}: \sum_{i=1}^3 (F_{Zi} \cdot r_{Yi} - F_{Yi} \cdot r_{Zi}) - G \cdot r_{YG} - M_k = 0 \quad (15)$$

$$M_{YA}: \sum_{i=1}^3 (F_{Xi} \cdot r_{Zi} - F_{Zi} \cdot r_{Xi}) + G \cdot r_{XG} = 0 \quad (16)$$

$$M_{ZA}: \sum_{i=1}^3 (F_{Yi} \cdot r_{Xi} - F_{Xi} \cdot r_{Yi}) = 0 \quad (17)$$

kde r vyjadřuje ramena sil, tj. nejkratší vzdálenosti jednotlivých bodů od nositelek sil. Jejich určení vychází z Obr. 35

Soustavu tvoří šest rovnic rovnováhy s devíti neznámými. Z toho vyplývá, že konstrukce je třikrát staticky neurčitá. K jejímu řešení byly zvoleny dva přístupy.

3.3.2.2 Výpočet – I. přiblížení

Jednou z možností je zjednodušení soustavy na tři rovnice o třech neznámých. Tento přístup plyne z úvahy dominantních reakcí ve směru osy Z_2 (vlivem tíhy motoru a krouticího momentu) oproti zbylým směřům (X_2 , Y_2). Výhodou tohoto přístupu je značně jednoduchý a rychlý výpočet, který dává uspokojivé výsledky ve směru osy Z_2 .

Po prvotní úvaze $F_X = F_Y = 0$ je zjednodušená soustava tvořena rovnicemi:

$$Z_2: \sum_{i=1}^3 F_{Zi} = 0 \rightarrow F_{Z_A} + F_{Z_B} + F_{Z_C} - G = 0 \quad (18)$$

$$M_{X_A}: \sum_{i=1}^3 (F_{Zi} \cdot r_{Yi}) - G \cdot r_{Y_G} - M_k = 0 \quad (19)$$

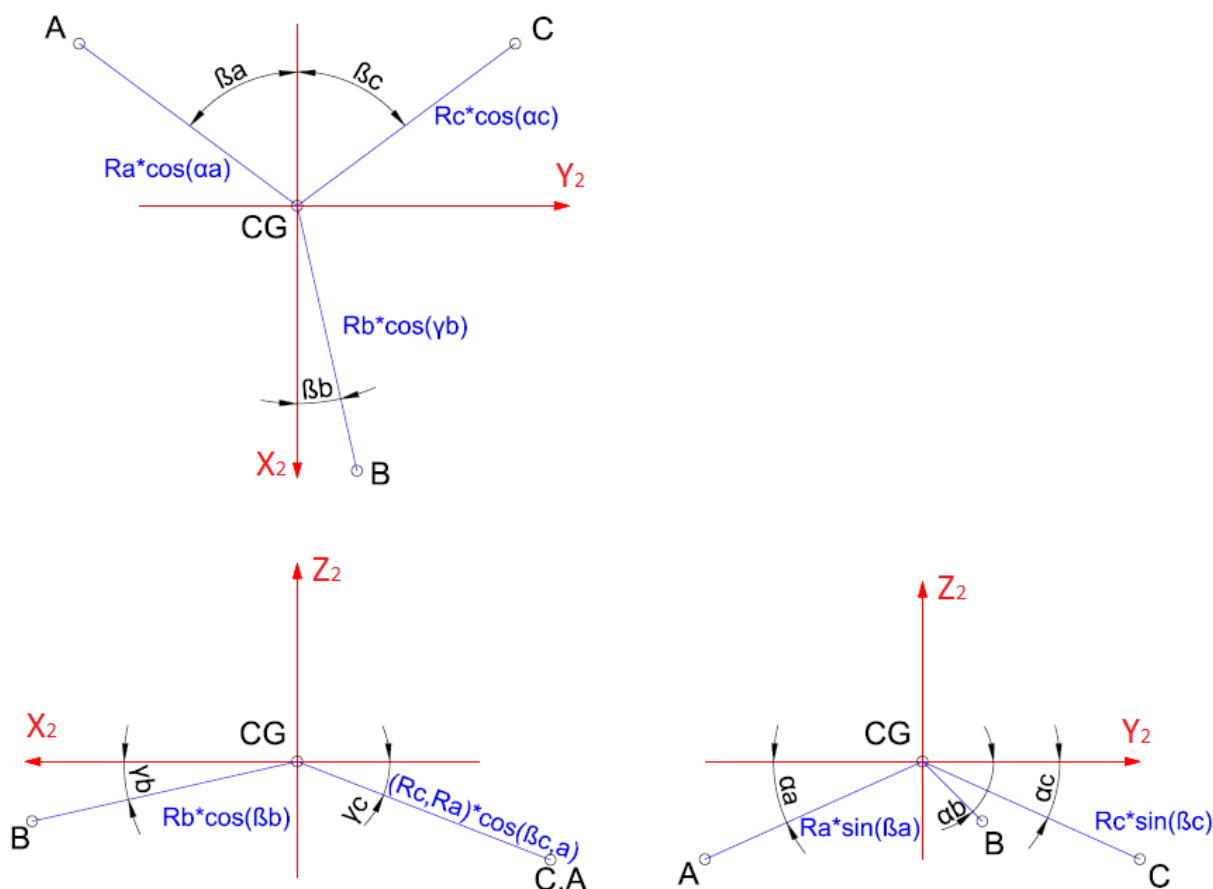
$$M_{Y_A}: \sum_{i=1}^3 (-F_{Zi} \cdot r_{Xi}) + G \cdot r_{X_G} = 0 \quad (20)$$

Po aplikaci reakcí v jednotlivých bodech:

$$M_{X_A}: F_{Z_C} \cdot r_{Y_C} + F_{Z_B} \cdot r_{Y_B} - G \cdot r_{Y_G} - M_k = 0 \quad (21)$$

$$M_{Y_A}: -F_{Z_C} \cdot r_{X_C} - F_{Z_B} \cdot r_{X_B} + G \cdot r_{X_G} = 0 \quad (22)$$

Na následujícím obrázku je znázorněn princip určení ramen sil r , který je následně využit při jejich výpočtu.



Obr. 35 Princip určení ramen sil

Velikosti jednotlivých úhlů a spojnic R_a , R_b a R_c byly odměřeny z modelu motoru v programu NX 8.5 a zaznamenány do následující tabulky.

Tab. 7 Velikosti jednotlivých úhlů a spojnic

Bod	A	B	C
R [mm]	301	296	314
α [°]	16,981	-	17,564
β [°]	46,012	8,858	44,935
γ [°]	-	7,241	-

$$r_{Y_C} = R_C \cdot \cos \alpha_C \cdot \sin \beta_C + R_A \cdot \cos \alpha_A \cdot \sin \beta_A =$$

$$= 296 \cdot \cos 17,564 \cdot \sin 44,935 + 301 \cdot \cos 16,981 \cdot \sin 46,012 = 407 \text{ mm}$$

$$r_{Y_B} = R_B \cdot \cos \gamma_B \cdot \sin \beta_B + R_A \cdot \cos \alpha_A \cdot \sin \beta_A =$$

$$= 314 \cdot \cos 7,241 \cdot \sin 8,858 + 301 \cdot \cos 16,981 \cdot \sin 46,012 = 255 \text{ mm}$$

$$r_{Y_G} = R_A \cdot \cos \alpha_A \cdot \sin \beta_A = 301 \cdot \cos 16,981 \cdot \sin 46,012 = 207 \text{ mm}$$

$$r_{X_C} = 0 \text{ mm}$$

$$r_{X_B} = R_B \cdot \cos \gamma_B \cdot \cos \beta_B + R_A \cdot \cos \alpha_A \cdot \cos \beta_A =$$

$$= 314 \cdot \cos 7,241 \cdot \cos 8,858 + 301 \cdot \cos 16,981 \cdot \cos 46,012 = 508 \text{ mm}$$

$$r_{X_G} = R_A \cdot \cos \alpha_A \cdot \cos \beta_A = 301 \cdot \cos 16,981 \cdot \cos 46,012 = 200 \text{ mm}$$

Velikost provozního krouticího momentu při max. trvalém výkonu motoru je dle rovnice (8) rovna:

$$M_k = 562,454 \text{ Nm}$$

Velikost tíhy motoru při násobku $n = 1$:

$$G = m_{eng} \cdot g = 98,6 \cdot 9,81 = 967,266 \text{ N} \quad (23)$$

Následným dosazení hodnot do rovnic (18), (21) a (22) získáme soustavu o třech neznámých:

$$F_{Z_A} + F_{Z_B} + F_{Z_C} = 967,266$$

$$255 \cdot F_{Z_B} + 407 \cdot F_{Z_C} = 762\,678$$

$$508 \cdot F_{Z_B} + 0 \cdot F_{Z_C} = 193\,453$$

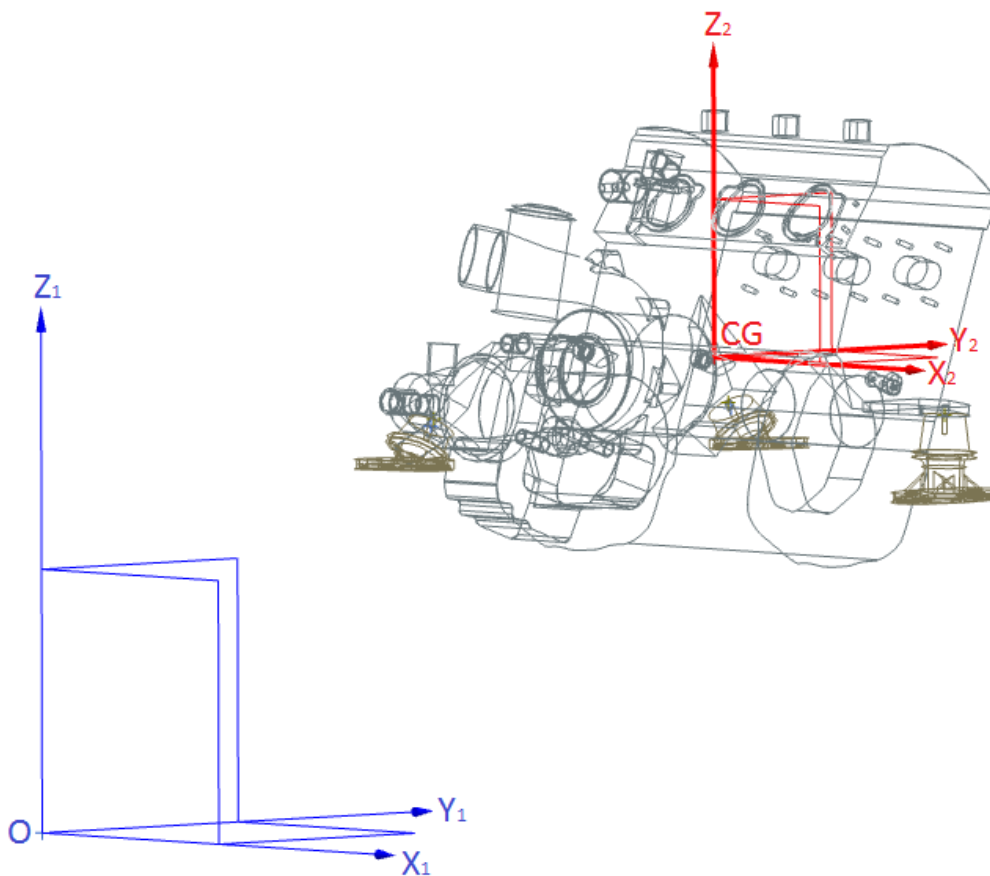
Výpočet soustavy rovnic byl proveden v programu Matlab R2012b. Jeho řešení je:

$$F_{Z_A} = -1049 \text{ N}; F_{Z_B} = 381 \text{ N}; F_{Z_C} = 1635 \text{ N}$$

3.3.2.3 Výpočet – deformační metoda

Tato metoda vychází z popisu pohybu tělesa (motoru) pomocí kinematických veličin. Tyto charakteristiky vyjadřují rovněž pohyb jednotlivých bodů tělesa, jehož poloha v prostoru je jednoznačně určena šesti nezávislými parametry. V tomto výpočtu bude poloha tělesa popsána souřadnicemi těžiště motoru (X_{CG} , Y_{CG} , Z_{CG}) a úhly natočení tělesa kolem jednotlivých os (φ_X , φ_Y , φ_Z).

Pohyb tělesa bude popisován v základním nehybném prostoru definovaný souřadným systémem (O , X_1 , Y_1 , Z_1) a v prostoru pevně spojeném s motorem – systémem (CG , X_2 , Y_2 , Z_2). Nutnou podmínkou výpočtu touto metodou je znalost tuhostí pružných členů v systému – silentbloků, na nichž je motor usazen.



Obr. 36 Zvolené souřadné systémy O , X_1 , Y_1 , Z_1 a CG , X_2 , Y_2 , Z_2

Pohyb motoru v prostoru (pohyb souřadného systému CG, X_2 , Y_2 , Z_2 v souřadném systému O, X_1 , Y_1 , Z_1) popisuje rozšířená transformační matice T_{12} . Tuto matici je možné vyjádřit součinem základních matic.

$$T_{12} = T_X(X_{1CG}) \cdot T_Y(Y_{1CG}) \cdot T_Z(Z_{1CG}) \cdot S_X(\varphi_X) \cdot S_Y(\varphi_Y) \cdot S_Z(\varphi_Z) \quad (24)$$

$T_X(X_{1CG})$ popisuje posuvný pohyb těžiště motoru podél osy X_1

$$T_X(X_{1CG}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_{1CG} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

$T_Y(Y_{1CG})$ popisuje posuvný pohyb těžiště motoru podél osy Y_1

$$T_Y(Y_{1CG}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & Y_{1CG} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

$T_Z(Z_{1CG})$ popisuje posuvný pohyb těžiště motoru podél osy Z_1

$$T_Z(Z_{1CG}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & Z_{1CG} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (27)$$

$S_X(\varphi_X)$ popisuje rotaci souřadného systému CG, X_2 , Y_2 , Z_2 kolem osy X_1 , vyjádřenou Cardanovým úhlem φ_X

$$S_X(\varphi_X) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi_X & -\sin \varphi_X \\ 0 & \sin \varphi_X & \cos \varphi_X \end{bmatrix} \quad (28)$$

$S_Y(\varphi_Y)$ popisuje rotaci souřadného systému CG, X_2 , Y_2 , Z_2 kolem osy Y_1 , vyjádřenou Cardanovým úhlem φ_Y

$$S_Y(\varphi_Y) = \begin{bmatrix} \cos \varphi_Y & 0 & \sin \varphi_Y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi_Y & 0 & \cos \varphi_Y \end{bmatrix} \quad (29)$$

$S_Z(\varphi_Z)$ popisuje rotaci souřadného systému CG, X_2 , Y_2 , Z_2 kolem osy Z_1 , vyjádřenou Cardanovým úhlem φ_Z

$$S_Z(\varphi_Z) = \begin{bmatrix} \cos \varphi_Z & -\sin \varphi_Z & 0 \\ \sin \varphi_Z & \cos \varphi_Z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (30)$$

Celkové natočení souřadného systému CG, X₂, Y₂, Z₂ vzhledem k systému O, X₁, Y₁, Z₁ popisuje matice směrových kosinů S₁₂

Matice směrových kosinů, vyjádřena Cardanovými úhly, se vypočte jako součin matic základních rotačních pohybů:

($c = \cos$, $s = \sin$)

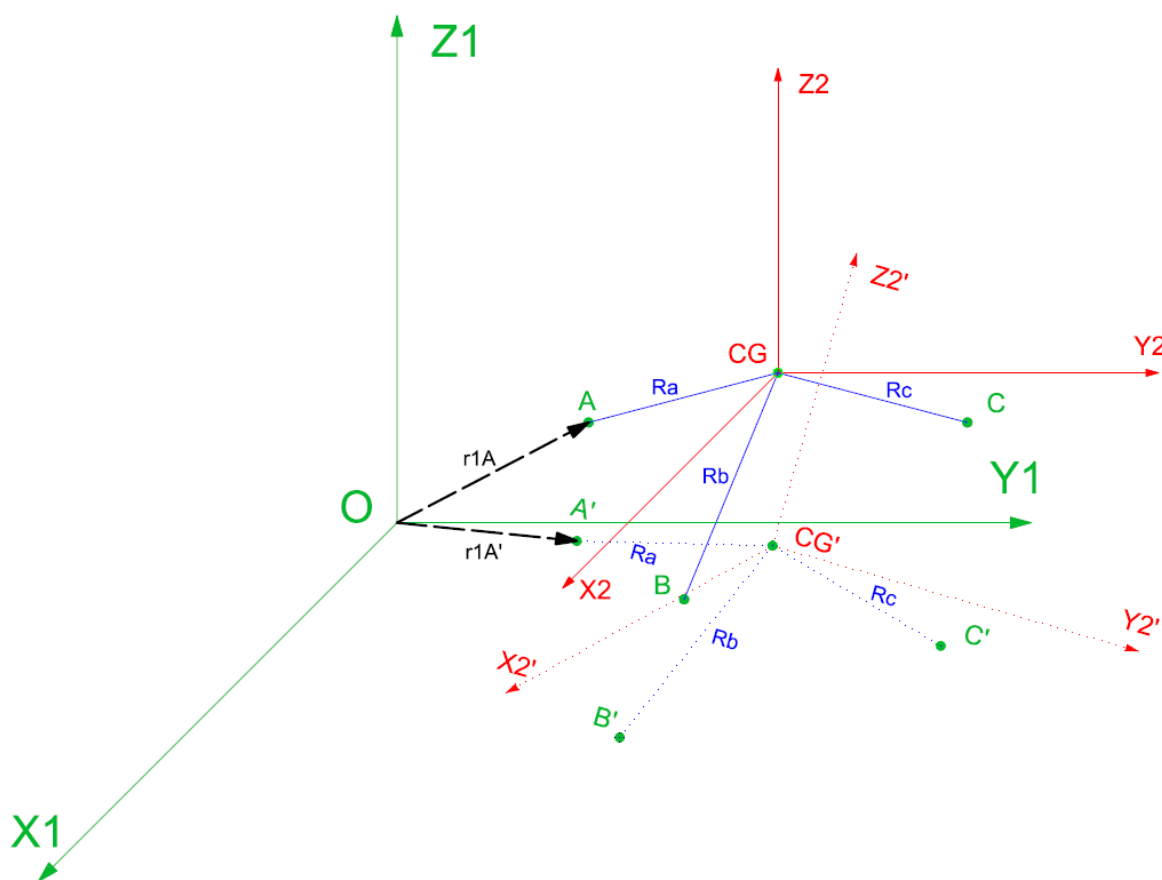
$$S_{12} = S_X(\varphi_X) \cdot S_Y(\varphi_Y) \cdot S_Z(\varphi_Z) =$$

$$= \begin{bmatrix} c\varphi_Y c\varphi_Z & -c\varphi_Y s\varphi_Z & s\varphi_Y \\ c\varphi_X s\varphi_Z + s\varphi_X s\varphi_Y c\varphi_Z & c\varphi_X c\varphi_Z - s\varphi_X s\varphi_Y s\varphi_Z & -s\varphi_X c\varphi_Y \\ s\varphi_X s\varphi_Z - c\varphi_X s\varphi_Y c\varphi_Z & s\varphi_X c\varphi_Z + c\varphi_X s\varphi_Y s\varphi_Z & c\varphi_X c\varphi_Y \end{bmatrix} \quad (31)$$

Transformační matice obecného prostorového pohybu motoru je dána vztahem:

$$T_{12} = \begin{bmatrix} X_{1CG} \\ S_{12} & Y_{1CG} \\ 0 & 0 & 0 & Z_{1CG} \\ & & & 1 \end{bmatrix} \quad (32)$$

Na následujícím obrázku je znázorněn průvodič bodu A v zatíženém a nezatíženém stavu. Obdobně lze nahlížet na body B, C a CG. Tyto průvodiče jsou popsány dále.



Obr. 37 Souřadný systém motoru - nezatíženého (A, B, C), zatíženého (A', B', C') vnější silou a momentem

Vektor r_{1A} je průvodič bodu A závěsu motoru, který není zatížen vnějšími silami a momenty (viz Obr. 37). Vyjádření r_{1A} v základním souřadném systému:

$$\vec{r}_{1A} = [X_{1A} \ Y_{1A} \ Z_{1A}]^T$$

Obdobné vyjádření vektorů r_{1B} , r_{1C} a r_{1CG}

$$\begin{aligned}\vec{r}_{1B} &= [X_{1B} \ Y_{1B} \ Z_{1B}]^T \\ \vec{r}_{1C} &= [X_{1C} \ Y_{1C} \ Z_{1C}]^T \\ \vec{r}_{1CG} &= [X_{1CG} \ Y_{1CG} \ Z_{1CG}]^T\end{aligned}$$

Vektory R_a , R_b a R_c mají konstantní velikost, neboť se motor uvažuje za dokonale tuhé těleso. Směr vektoru se rovněž nemění, neboť se při zatížení natáčí spolu se souřadným systémem motoru.

Vyjádření vektoru R_a , R_b a R_c v souřadném systému motoru:

$$\begin{aligned}\vec{R}_a &= [X_{2A} \ Y_{2A} \ Z_{2A}]^T \\ \vec{R}_b &= [X_{2B} \ Y_{2B} \ Z_{2B}]^T \\ \vec{R}_c &= [X_{2C} \ Y_{2C} \ Z_{2C}]^T\end{aligned}$$

Vektory r'_{1A} , r'_{1B} , r'_{1C} a r'_{1CG} představují průvodiče jednotlivých bodů závěsu a těžiště motoru zatíženého příslušným krouticím momentem a vnější silou.

Pro tyto průvodiče platí vztahy:

$$\begin{aligned}\vec{r}'_{1A} &= T_{12} \cdot \vec{R}_a \\ \vec{r}'_{1B} &= T_{12} \cdot \vec{R}_b \\ \vec{r}'_{1C} &= T_{12} \cdot \vec{R}_c \\ \vec{r}'_{1CG} &= T_{12} \cdot [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T\end{aligned}$$

Rozdíl vektoru $r'_{1A} - r_{1A}$ je poté roven posunutí bodu A podél osy X_1 , Y_1 a Z_1 (obdobně pro body B, C a CG).

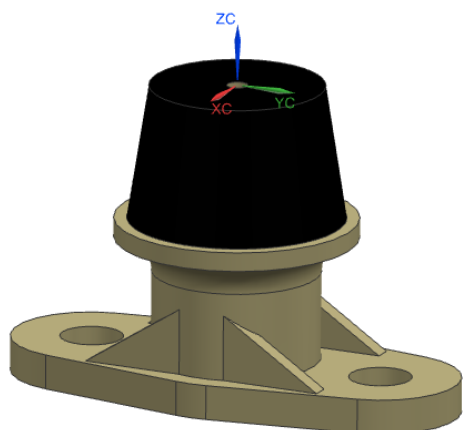
$$\begin{aligned}\vec{r}'_{1A} - \vec{r}_{1A} &= [\Delta X_{1A} \ \Delta Y_{1A} \ \Delta Z_{1A}]^T \\ \vec{r}'_{1B} - \vec{r}_{1B} &= [\Delta X_{1B} \ \Delta Y_{1B} \ \Delta Z_{1B}]^T \\ \vec{r}'_{1C} - \vec{r}_{1C} &= [\Delta X_{1C} \ \Delta Y_{1C} \ \Delta Z_{1C}]^T \\ \vec{r}'_{1CG} - \vec{r}_{1CG} &= [\Delta X_{1CG} \ \Delta Y_{1CG} \ \Delta Z_{1CG}]^T\end{aligned}$$

Po výpočtu posunutí jednotlivých bodů závěsů v souřadném systému O , X_1 , Y_1 , Z_1 je pro další postup třeba znát tuhosti jednotlivých silentbloků. Proto jim bude věnována následující část.

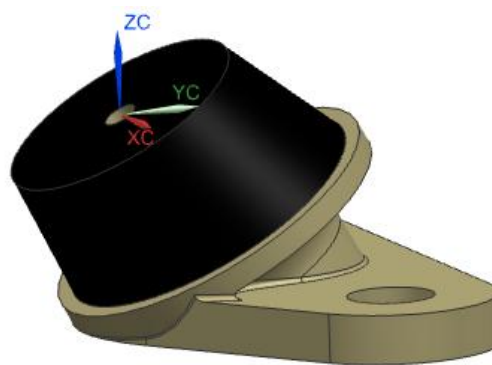
3.3.2.4 Zkouška tuhosti silentbloků

Znalost tuhostí jednotlivých silentbloků ve směrech určených osami souřadného systému CG, X_2 , Y_2 , Z_2 je nezbytná pro pokračující výpočty reakcí v závěsech motoru. Závěsy motoru jsou tvořeny základnou, na které je navulkanizovaná polyuretanová pryž. Základna, vyrobená ze slitiny hliníku 6061 T6, se uvažuje za dokonale tuhé těleso. Silentblok výrazným způsobem omezuje přenos vibrací a rázů mezi motorem a ložem. Tuhost silentbloku ovlivňuje jeho vlastní frekvenci. Ta by měla být v provozních otáčkách motoru vyšší než vlastní frekvence motorového lože.

Výrobce nezveřejňuje informaci o tuhostech silentbloků, a proto je nutné je naměřit.



Obr. 38 Model silentbloku B (přední)

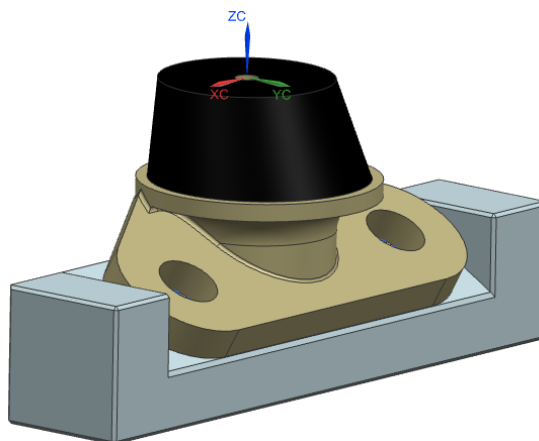


Obr. 39 Model silentbloku A (C - boční)

Principem zkoušky je deformace pryže (u) silou (F) o známé velikosti. Z hodnoty deformace a síly je pak podle rovnice (33) možné stanovit tuhost pryže (K) v daném směru.

$$F = K \cdot u \quad (33)$$

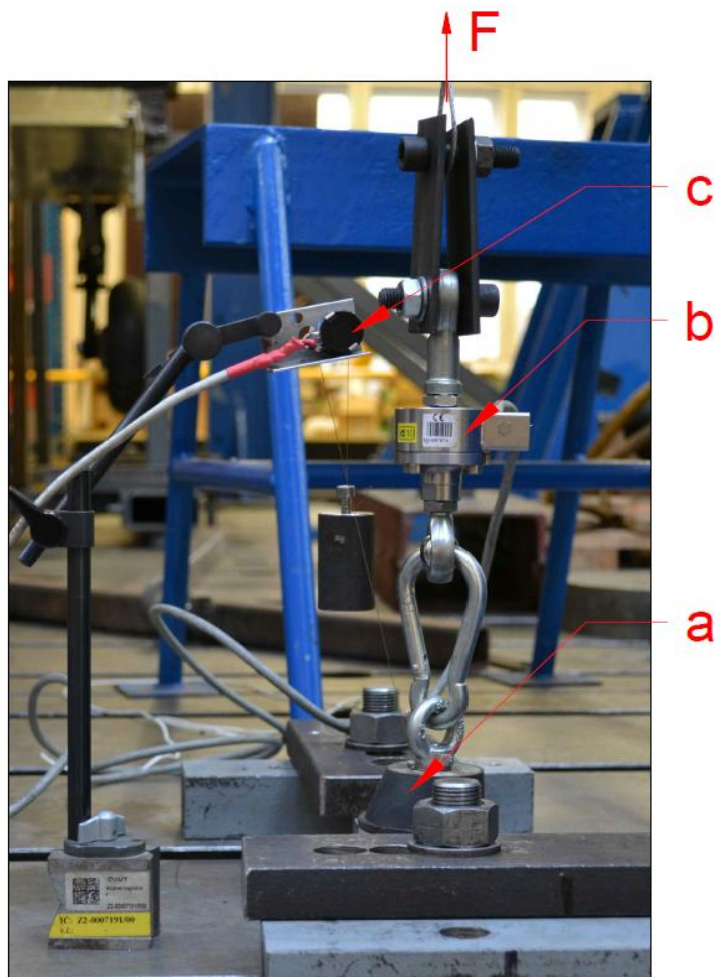
Přední silentblok je symetrický, a proto je jeho deformace měřena pouze ve směru osy Z_2 a X_2 . Boční silentblok byl nejprve vyhodnocen ve třech osách souřadného systému s vodorovně uloženou základnou (viz obr. 39). Poté byl upnut do přípravku, který natočil souřadný systém o úhel $\varphi_X = 30^\circ$ a zajistil tak vodorovnou stykovou plochu silentbloku (viz obr. 40).



Obr. 40 Závěs A (C) umístěný v přípravku

Postup měření

Silentblok (a), pevně uchycen k základně, je přes snímač síly (b) zatěžován plynule rostoucí silou generovanou hydraulickým válcem. Vlivem zatížení vzniká deformace, která je přes strunu přenášena na polohoměr (c). Hodnoty síly a deformace jsou vzorkovány a ukládány do programu catmanEASY.



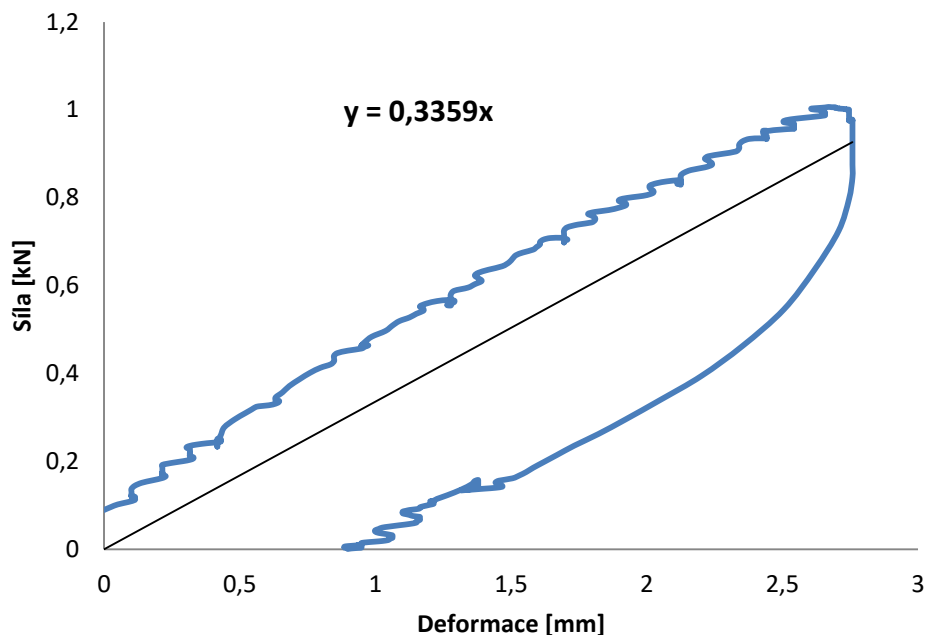
Obr. 41 Způsob měření tuhosti silentbloku

Informace o senzorech

Snímač síly		Polohoměr - lineár. potenciometr	
Výrobce	HBH	Výrobce	VISHAY
Typ	U2B	Typ	534
Rozsah síly [kN]	10	Tolerance	$\pm 5\%$
Působení síly	tah/tlak	Linearita	$\pm 0,25\%$
Citlivost [mV/V]	2		

Naměřené hodnoty byly vyhodnoceny v programu MS Office a graficky zpracovány. Z grafů je patrná hystereze způsobená vnitřním třením materiálu. Naměřená charakteristika byla pro jednoduchost linearizována. Směrnice přímký pak přímo určuje tuhost silentbloku v daném směru.

Pro příklad je zde uvedena charakteristika předního silentbloku B zatíženého ve směru osy Z_2 . Zbylé charakteristiky jsou uvedeny v příloze (kap. 7.1).



Graf 1 Tuhost silentbloku B ve směru osy Z_2

Souhrnný přehled tuhostí silentbloků v jednotlivých směrech zobrazuje následující tabulka.

Tab. 8 Přehled tuhostí silentbloků

Tuhosti K [N/mm]			
Osa	Přední silentblok (B)	Boční silentblok (A, C)	
		$\varphi_X = 30^\circ$	$\varphi_X = 0^\circ$
X_2	60	81	101
Y_2	60	88	84
Z_2	336	662	256

Z výsledků měření je patrná dominantní tuhost silentbloku ve směru osy Z_2 , tedy ve směru největšího zatížení.

Při znalosti tuhostí silentbloků, je možné reakce v závěsech motoru vyjádřit následujícími vztahy:

$$\vec{F}_A = -K_A \cdot (\vec{r}'_{1A} - \vec{r}_{1A}) = -K_A \cdot (T_{12} \cdot \vec{r}_{2A} - \vec{r}_{1A}) \quad (34)$$

$$\vec{F}_B = -K_B \cdot (\vec{r}'_{1B} - \vec{r}_{1B}) = -K_B \cdot (T_{12} \cdot \vec{r}_{2B} - \vec{r}_{1B}) \quad (35)$$

$$\vec{F}_C = -K_C \cdot (\vec{r}'_{1C} - \vec{r}_{1C}) = -K_C \cdot (T_{12} \cdot \vec{r}_{2C} - \vec{r}_{1C}) \quad (36)$$

kde K_A , K_B , K_C jsou tuhostní diagonální matice, vyjadřující tuhosti silentbloků v jednotlivých směrech

$$K = \begin{bmatrix} K_X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_Y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_Z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (37)$$

Reakce motoru v jednotlivých závěsech se získají řešením soustavy tvořenou šesti rovnicemi rovnováhy.

Rovnice jsou vztaženy k počátku základního souřadného systému (O, X_1 , Y_1 , Z_1).

$$\vec{F}_A + \vec{F}_B + \vec{F}_C - [0 \ 0 \ G \ 0]^T = 0 \quad (38)$$

$$\vec{r}'_{1A} \times \vec{F}_A + \vec{r}'_{1B} \times \vec{F}_B + \vec{r}'_{1C} \times \vec{F}_C - \vec{r}'_{1CG} \times \vec{G} - [M_K \ 0 \ 0 \ 0]^T = 0 \quad (39)$$

Dosazením výrazů (34-36) do rovnic (38 a 39) získáme následující soustavu:

$$\begin{aligned} & K_A \cdot (T_{12} \cdot \vec{r}_{2A} - \vec{r}_{1A}) + K_B \cdot (T_{12} \cdot \vec{r}_{2B} - \vec{r}_{1B}) + K_C \cdot (T_{12} \cdot \vec{r}_{2C} - \vec{r}_{1C}) - T_{12} \cdot [0 \ 0 \ G \ 0]^T = 0 \\ & (T_{12} \cdot \vec{R}a) \times (K_A \cdot (T_{12} \cdot \vec{r}_{2A} - \vec{r}_{1A})) + (T_{12} \cdot \vec{R}b) \times (K_B \cdot (T_{12} \cdot \vec{r}_{2B} - \vec{r}_{1B})) + \\ & + (T_{12} \cdot \vec{R}c) \times (K_C \cdot (T_{12} \cdot \vec{r}_{2C} - \vec{r}_{1C})) - (T_{12} \cdot [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T) \times ([0 \ 0 \ G \ 0]^T) - [M_K \ 0 \ 0 \ 0]^T = \\ & = 0 \end{aligned}$$

Newtonova metoda

Neznámými v soustavě nelineárních rovnic jsou souřadnice polohy těžiště a úhly natočení souřadných os zatíženého motoru v základním souřadném systému. Vzhledem k vazbě neznámých na geometrické funkce byla zvolena, k numerickému řešení, Newtonova metoda, též nazývaná metoda tečen.

Tato metoda nalézá řešení $f(X_n) = 0$ za předpokladu znalosti přibližného řešení

$X_n = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6]^T$ a derivace $\frac{\partial f(x)}{\partial X}$, tedy směrnice tečny ke křivce.

Princip metody:

Hodnota X_n představuje přibližný odhad řešení. Ke křivce $f(X)$ je v bodě $f(X_n)$ sestrojena tečna. V průsečíku tečny a osy X vzniká nový přibližný odhad řešení (X_{n+1}). Následně se celý postup opakuje, dokud hodnota $f(X_n)$ neleží dostatečně blízko nuly. [16]

Iterační postup lze popsat následujícím vztahem:

$$X_{n+1} = X_n - J(X_n)^{-1} \cdot f(X_n) \quad (40)$$

Kde $J(X_n)$ je Jacobiho matice, tvořena parciálními derivacemi:

$$J(X_n) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial X_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial X_k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_k}{\partial X_1} & \dots & \frac{\partial f_k}{\partial X_k} \end{bmatrix} \quad (41)$$

Soustava nelineárních rovnic byla řešena za pomoci Newtonovy metody v programu Matlab R2012b. Zdrojový kód algoritmu je součástí přílohy (kap. 7.2).

Do rovnic byla dosazena hodnota tíhy a krouticího momentu shodná s výpočtem – I. přiblížení, tedy $G = 967,266 \text{ N}$ a $M_k = 562,454 \text{ Nm}$. Řešením soustavy rovnic je:

Tab. 9 Výsledky - deformační metoda

Reakce	A	B	C
$F_x \text{ [N]}$	8,4	0,7	-9,1
$F_y \text{ [N]}$	3,5	-7,0	3,5
$F_z \text{ [N]}$	-1022,1	387,0	1602,3

Při porovnání reakcí ve směru osy Z_2 s hodnotami vypočtenými v I. přiblížení (kap. 3.3.2.2) je patrná jejich odchylka (do 3 %), způsobená příslušným zjednodušením.

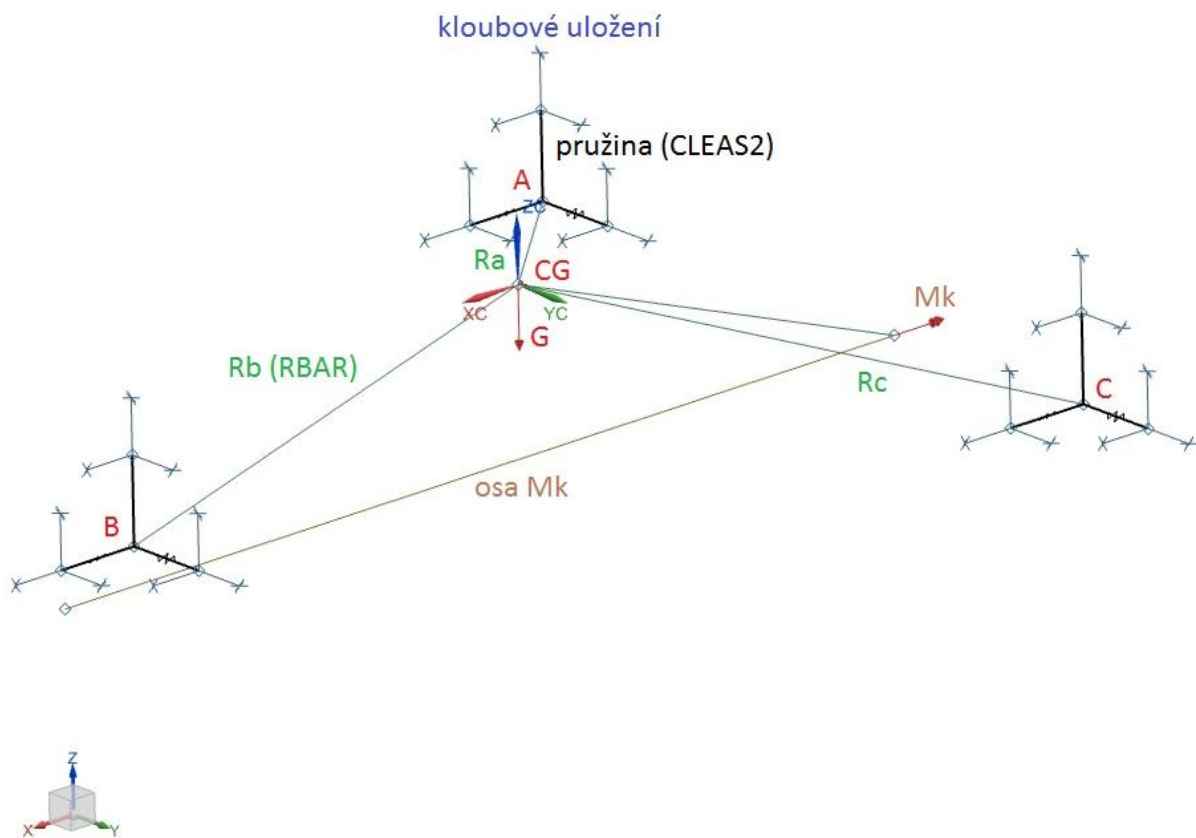
3.3.3 Výpočet metodou konečných prvků

MKP model motoru

Model motoru byl vytvořen v programu NX 8.5, který obsahuje početní nastavbu NX NASTRAN. Tato programová nastavba provádí samotný výpočet metodou konečných prvků.

Motor, uvažovaný za dokonale tuhé těleso, byl nahrazen spojnicemi těžiště s jednotlivými závěsy a osou kroučícího momentu. Tyto spojnice byly modelovány pomocí jednorozměrných prvků RBAR, které se vyznačují nulovou hmotností a absolutní tuhostí. Nedefinují se u nich tedy žádné materiálové ani průřezové charakteristiky. Přenášejí zatížení pouze v osovém směru.

Silentbloky byly nahrazeny soustavou tří pružin, spojených v bodě závěsu, se směrem souřadných os. Tyto pružiny byly modelovány pomocí prvků CELAS2, u nichž se definovala tuhost v příslušném směru. Hodnoty tuhostí byly vzaty z výsledků zkoušky. Jednotlivé konce pružin byly kloubově uloženy. Byly jim tedy ponechány pouze tři stupně volnosti (rotace), což více odpovídá reálnému stavu.



Obr. 42 Schéma modelu motoru pro výpočet reakcí MKP

Zatížení motoru pro výpočet MKP

Motor byl zatížen samotnou tíhou a provozním krouticím momentem o shodné velikosti s analytickým řešením. Vypočtené hodnoty spolu s výsledky analytického řešení zobrazuje následující tabulka.

Tab. 10 Reakce v závěsech od G a Mk řešené analyticky a MKP

Výpočet	Analytický			MKP		
	A	B	C	A	B	C
Závěs						
F_x [N]	8,4	0,7	-9,1	8,4	0,7	-9,1
F_y [N]	3,5	-7,0	3,5	3,5	-7,0	3,5
F_z [N]	-1022,1	387,0	1602,3	-1022,1	387,0	1602,3

Z výsledků uvedených v tabulce vyplývá, že oba dva způsoby výpočtu reakcí motorového lože jsou shodné. V následujících výpočtech reakcí od zatížení bude proto aplikován analytický přístup, pro jeho jednoduchost a rychlé řešení.

3.3.4 Tabulka reakcí závěsů motoru

Na základě vybraného zatížení motoru (viz Tab. 4-6) byly pomocí analytického přístupu vypočteny reakce v jeho uložení. Tyto reakce budou následně využity při návrhu a pevnostní kontrole jednotlivých kompozitních podpěr pohonné jednotky. Hodnoty reakcí zobrazuje následující tabulka.

Tab. 11 Reakce závěsů motoru od vybraného zatížení

Zatížení	Reakce v závěsu A			Reakce v závěsu B			Reakce v závěsu C		
	F _x [N]	F _y [N]	F _z [N]	F _x [N]	F _y [N]	F _z [N]	F _x [N]	F _y [N]	F _z [N]
1	480	4	-1275	268	-8	2428	416	4	5272
2	629	1	-52	357	-1	3236	567	0	5383
3	424	3	1018	238	-5	4577	373	3	6177
4	465	4	-5507	260	-8	-3077	402	4	1206
5	755	1	-1301	428	-1	2278	680	1	5281
6	996	-4	-87	570	8	3036	918	-4	5395
7	-217	-956	-416	24	-990	1	193	-956	415
8	-5717	65	-647	-3321	-129	1733	-5472	65	-1086
9	217	957	416	-24	990	-1	-193	956	-415

3.4 Pevnostní kontrola motorového lože

3.4.1 Příprava výpočtu motorového lože

Motorové lože je tvořeno podpěrami z kompozitního materiálu, jehož pevnostní kontrola analytickým způsobem je značně náročná. Z toho důvodu bylo přistoupeno k numerickému řešení metodou konečných prvků pomocí nástavby programu NX 8.5 – NX PATRAN a NX NASTRAN. Kde NX PATRAN je pre- a post-procesorem programu NX NASTRAN. Do programu NX PATRAN byly jednotlivě nahrány sestavy z modelů podpěr a silentbloků, které byly vytvořeny v NX 8.5. Podpěry ve formě ploch a silentbloky ve formě 3D těles.

1. Kompozitní podpěry

Modely podpěr byly doplněny o kruhové plochy definující závitové vložky (inserty) a otvory pro šroubové spojení se silentbloky. Síť byla vytvořena pomocí trojúhelníkových elementů o velikosti 7 mm. Zároveň byl brán zřetel na celistvost a návaznost sítě na jednotlivých plochách. Po kontrole sítě bylo přistoupeno k definování vlastností použitých materiálů – uhlíková tkanina, skleněná tkanina, překližka a hliníková slitina 6061. Vlastnosti těchto materiálů jsou uvedeny v příloze (kap. 7.3). Dále pomocí modulu Laminate byla stanovena skladba kompozitu a kritérium, podle kterého bude vyhodnocováno porušení materiálu.

2. Silentbloky

Jednotlivé modely silentbloků byly rozděleny na dvě části – pryžovou (deformovanou) část a tuhou základnu. Na pryžové a tuhé části byly aplikovány oddělené 3D sítě s trojúhelníkovými elementy tak, aby jim bylo možné přiřadit různé materiály. Základna silentbloku je vyrobena z hliníkové slitiny 6061. Pryž bylo nutné definovat. Její izotropní materiálové vlastnosti vycházejí ze zkoušky tuhosti silentbloků. Při znalosti tuhosti a geometrie lze pomocí Hookova zákona stanovit modul pružnosti:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (42)$$

$$E = \frac{F \cdot l_0}{A \cdot \Delta l} \quad (43)$$

kde F je zatěžující síla, l_0 je počáteční délka (výška pryže), A je střední plocha a Δl je změna délky

$$\text{Boční silentblok: } E = \frac{F \cdot l_0}{A \cdot \Delta l} = \frac{662,4 \cdot 28}{2550 \cdot 1} = 7,27 \text{ Nmm}^{-2}$$

$$\text{Přední silentblok: } E = \frac{F \cdot l_0}{A \cdot \Delta l} = \frac{335,9 \cdot 39}{2462 \cdot 1} = 5,32 \text{ Nmm}^{-2}$$

Dále pak byla převzata z materiálové databáze programu NX 8.5 hustota pryže a její Poissonovo číslo.

$$\rho = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ kgmm}^{-3}; \mu = 0,4$$

Po přiřazení materiálů silentbloku, byly jeho sítě „slepeny“ v modulu Mesh mating condition (MMC) tak, aby vytvořily jeden celek.

3. Šroubové spojení

Modely šroubů upevňující silentbloky k podpěrám pomocí závitových vložek byly nahrazeny elementy BEAM a RBE2. Elementy BEAM představují nosník definovaného průřezu (v tomto případě kruhového), přenášející kombinované zatížení tahem (tlakem), ohybem a krutem. Těmto elementům se přiřazují materiálové a průřezové charakteristiky (velikost průměru).

RBE2 jsou absolutně tuhé prvky, pevně spojené s uzly elementů, přenášející pouze osové síly. Nedefinují se u nich žádné parametry.



Obr. 43 Síťový model

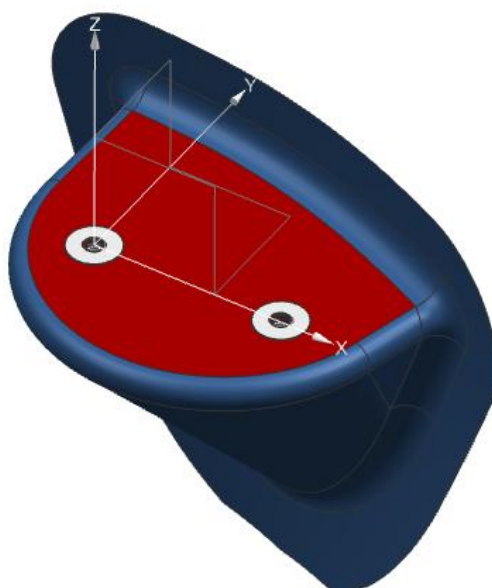
3.4.2 Návrh skladby kompozitního materiálu podpěr

Při návrhu kompozitního materiálu byla zvolena jako dominantní výztuž uhlíkovými vlákny ve formě tkanin (prepreg). Z důvodu hmotnostní úspory a vyšší pevnosti. Dále byla použita prepregová tkanina se skleněnými vlákny jako technologická vrstva oddělující uhlíková vlákna a závitové vložky ze slitiny hliníku. Tato vrstva zabraňuje vzniku galvanické koroze. Na dosedací ploše silentbloků, kde je velké zatížení, bylo použito jádro – překližka. Ta vyniká vyšší pevností v tlaku a ve smyku. Zároveň zvyšuje ohybovou tuhost kompozitu. Překližka obsahuje frézované otvory pro kónické závitové vložky, které jsou zde přilepeny.

Při návrhu jednotlivých skladeb (množství tkanin a jejich orientace) byla určující velikost a směr působícího zatížení.

1. Podpěra A

Na obrázku znázorňujícím jednotlivé skladby je souřadnou osou X určena orientace vláken 0° . Osy zobrazeného souřadného systému jsou rovnoběžné se souřadnými osami motoru.



Obr. 44 Skladby materiálu podpěry A

Skladba č. 1 podpěry A (modré plochy) je tvořena šesti vrstvami uhlíkové tkaniny (viz Tab. 12). Vrstvy jsou v pořadí, v jakém jsou vkládány do negativní formy.

Tab. 12 Podpěra A - skladba č. 1

vrstva	materiál	tloušťka [mm]	orientace [°]
1	tkanina uhlík 200g/m2	0,2	0
2	tkanina uhlík 200g/m2	0,2	45
3	tkanina uhlík 200g/m2	0,2	0
8	tkanina uhlík 200g/m2	0,2	0
9	tkanina uhlík 200g/m2	0,2	45
10	tkanina uhlík 200g/m2	0,2	0

Červená plocha znázorňuje oblast se skladbou č. 2. Tato skladba je složena ze šesti vrstev uhlíkové tkaniny, dvou vrstev skleněné tkaniny a překližky.

Tab. 13 Podpěra A - skladba č. 2

vrstva	materiál	tloušťka [mm]	orientace [°]
1	tkanina uhlík 200g/m2	0,2	0
2	tkanina uhlík 200g/m2	0,2	45
3	tkanina uhlík 200g/m2	0,2	0
4	tkanina sklo 100g/m2	0,1	45
5	překližka	3	-
7	tkanina sklo 100g/m2	0,1	45
8	tkanina uhlík 200g/m2	0,2	0
9	tkanina uhlík 200g/m2	0,2	45
10	tkanina uhlík 200g/m2	0,2	0

Bílé kruhové plochy znázorňují oblasti se skladbou č. 3. Ta je shodná se skladbou č. 2. Pouze je zde místo překližky závitová vložka. Ta je k překližce přilepena a přelaminována tak, aby nedošlo k jejímu vytržení.

Tab. 14 Podpěra A - skladba č. 3

vrstva	materiál	tloušťka [mm]	orientace [°]
1	tkanina uhlík 200g/m ²	0,2	0
2	tkanina uhlík 200g/m ²	0,2	45
3	tkanina uhlík 200g/m ²	0,2	0
4	tkanina sklo 100g/m ²	0,1	45
6	závitová vložka	6	-
7	tkanina sklo 100g/m ²	0,1	45
8	tkanina uhlík 200g/m ²	0,2	0
9	tkanina uhlík 200g/m ²	0,2	45
10	tkanina uhlík 200g/m ²	0,2	0

2. Podpěra C

Podpěra C je oproti podpěře A vystavena většímu zatížení ve směru osy Z. Z toho důvodu byla navržená skladba doplněna o jednu vrstvu uhlíkové tkaniny s orientací 45°. Základní skladba č. 1 je tak tvořena sedmi vrstvami uvedených v tabulce.

Umístění jednotlivých skladeb kompozitu je shodné s podpěrou A.

Tab. 15 Podpěra C - skladba č. 1

vrstva	materiál	tloušťka [mm]	orientace [°]
1	tkanina uhlík 200g/m ²	0,2	0
2	tkanina uhlík 200g/m ²	0,2	45
3	tkanina uhlík 200g/m ²	0,2	0
4	tkanina uhlík 200g/m ²	0,2	45
9	tkanina uhlík 200g/m ²	0,2	0
10	tkanina uhlík 200g/m ²	0,2	45
11	tkanina uhlík 200g/m ²	0,2	0

Přidaná vrstva rovněž rozšířila skladbu 2 a 3.

Tab. 16 Podpěra C - skladba č. 2

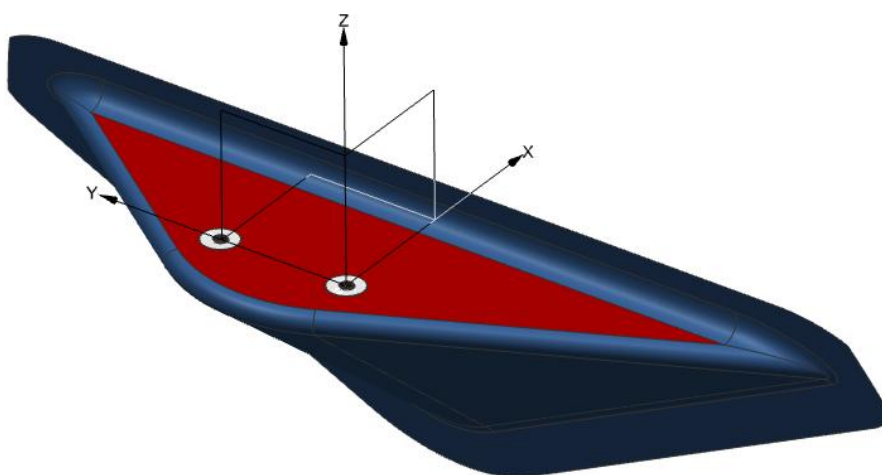
vrstva	materiál	tloušťka [mm]	orientace [°]
1	tkanina uhlík 200g/m ²	0,2	0
2	tkanina uhlík 200g/m ²	0,2	45
3	tkanina uhlík 200g/m ²	0,2	0
4	tkanina uhlík 200g/m ²	0,2	45
5	tkanina sklo 100g/m ²	0,1	45
6	překližka	3	-
8	tkanina sklo 100g/m ²	0,1	45
9	tkanina uhlík 200g/m ²	0,2	0
10	tkanina uhlík 200g/m ²	0,2	45
11	tkanina uhlík 200g/m ²	0,2	0

Tab. 17 Podpěra C - skladba č. 3

vrstva	materiál	tloušťka [mm]	orientace [°]
1	tkanina uhlík 200g/m2	0,2	0
2	tkanina uhlík 200g/m2	0,2	45
3	tkanina uhlík 200g/m2	0,2	0
4	tkanina uhlík 200g/m2	0,2	45
5	tkanina sklo 100g/m2	0,1	45
7	závitová vložka	6	-
8	tkanina sklo 100g/m2	0,1	45
9	tkanina uhlík 200g/m2	0,2	0
10	tkanina uhlík 200g/m2	0,2	45
11	tkanina uhlík 200g/m2	0,2	0

3. Podpěra B

Následující obrázek znázorňuje aplikaci jednotlivých skladeb. Na modrých plochách je použita skladba č. 1 se sedmi vrstvami uhlíkové tkaniny. Souřadná osa X definuje orientaci vláken 0°.



Obr. 45 Podpěra B - skladba materiálu

Tab. 18 Podpěra B - skladba č. 1

vrstva	materiál	tloušťka [mm]	orientace [°]
1	tkanina uhlík 200g/m2	0,2	0
2	tkanina uhlík 200g/m2	0,2	45
3	tkanina uhlík 200g/m2	0,2	0
9	tkanina uhlík 200g/m2	0,2	45
10	tkanina uhlík 200g/m2	0,2	0
11	tkanina uhlík 200g/m2	0,2	45
12	tkanina uhlík 200g/m2	0,2	0

Skladba č. 2 (červená plocha) je vyztužena překližkou a doplněna o jednu vrstvu uhlíkové (orientace 45°) a dvě vrstvy skelné tkaniny (orientace 0°).

Tab. 19 Podpěra B - skladba č. 2

vrstva	materiál	tloušťka [mm]	orientace [°]
1	tkanina uhlík 200g/m2	0,2	0
2	tkanina uhlík 200g/m2	0,2	45
3	tkanina uhlík 200g/m2	0,2	0
4	tkanina sklo 100g/m2	0,1	0
5	překližka	3	-
7	tkanina sklo 100g/m2	0,1	0
8	tkanina uhlík 200g/m2	0,2	45
9	tkanina uhlík 200g/m2	0,2	45
10	tkanina uhlík 200g/m2	0,2	0
11	tkanina uhlík 200g/m2	0,2	45
12	tkanina uhlík 200g/m2	0,2	0

Skladba v místě závitových vložek je shodná se skladbou č. 2. Pouze zde není použita překližka.

Tab. 20 Podpěra B - skladba č. 3

vrstva	materiál	tloušťka [mm]	orientace [°]
1	tkanina uhlík 200g/m2	0,2	0
2	tkanina uhlík 200g/m2	0,2	45
3	tkanina uhlík 200g/m2	0,2	0
4	tkanina sklo 100g/m2	0,1	0
6	závitová vložka	6	-
7	tkanina sklo 100g/m2	0,1	0
8	tkanina uhlík 200g/m2	0,2	45
9	tkanina uhlík 200g/m2	0,2	45
10	tkanina uhlík 200g/m2	0,2	0
11	tkanina uhlík 200g/m2	0,2	45
12	tkanina uhlík 200g/m2	0,2	0

3.4.3 Výpočet a vyhodnocení výsledků analýzy MKP

Podpěry budou řešeny jednotlivě bez pohonné jednotky a okolní konstrukce. Vstupní kanály a přední motorová přepážka, na které jsou podpěry upevněny, budou uvažovány za absolutně tuhé. Takto navržený výpočet je značně zjednodušený. Ideální výpočet by zahrnoval všechny podpěry včetně silentbloků, motor a konstrukci trupu, kde dochází k přerozdělování napětí podle jeho tuhosti. Další zjednodušení se dotklo závitové vložky, která ve výpočtu není kónická, ale válcová (ve 2D laminování nelze docílit kuželového tvaru). Zároveň není uvažována vazba (lepený spoj) mezi vložkou a překližkou. Tato zjednodušení jsou na straně bezpečnosti.

Zatížení podpěr bude realizováno přes pružnou část silentbloků. Případy zatížení vycházejí z vypočtených reakcí motorového lože uvedených v Tab. 11. Okrajové podmínky jsou zavedené na lemování podpěr. Odebírají šest stupňů volnosti.

Výsledkem výpočtu je součinitel poruchy kompozitu (Failure index), který podle definovaných kritérií analyzuje porušení elementů. V případě, že dojde k poruše, součinitel poruchy překročí hodnotu jedna.

Výsledky také zahrnují osová a kolmá napětí vláken a smyková napětí laminátu.

Hoffmanovo kritérium porušení

Hoffmanovo kritérium bylo zvoleno pro výpočet součinitele poruchy materiálu. Jedná se o interaktivní kritérium. Tedy zahrnuje vazbu mezi normálovými složkami napětí a mezi normálovými a smykovými složkami napětí. [17]

Vyjádření Hoffmanova kritéria porušení pro rovinnou napjatost v rovině vrstvy laminátu:

$$FI = \frac{\sigma_1^2}{X_T X_C} - \frac{\sigma_1 \sigma_2}{X_T X_C} + \frac{\sigma_2^2}{Y_T Y_C} - \frac{(X_T - X_C)}{X_T X_C} \sigma_1 - \frac{(Y_T - Y_C)}{Y_T Y_C} \sigma_2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 < 1,0 \quad (44)$$

X_T, Y_T [Nmm⁻²] – meze pevnosti v tahu ve směru podélném, příčném na vrstvu

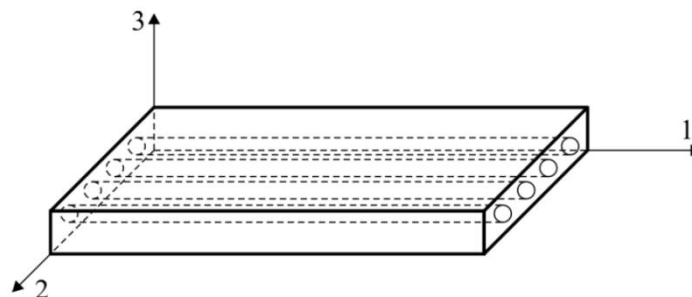
X_C, Y_C [Nmm⁻²] – meze pevnosti v tlaku ve směru podélném, příčném na vrstvu

S [Nmm⁻²] – podélná mez pevnosti ve smyku

σ_1, σ_2 [Nmm⁻²] – normálové napětí v kompozitu (směr 1, 2)

τ_{12} [Nmm⁻²] – smykové napětí v kompozitu (rovina 12)

Index 1 značí podélný směr vláken v laminátu, index 2 kolmý směr v rovině vláken (viz Obr. 46)



Obr. 46 Směry materiálu v laminátu

Zdroj: Krystek J., Pevnostní kritéria pro kompozitní materiály

Vyhodnocení jednotlivých případů zatížení

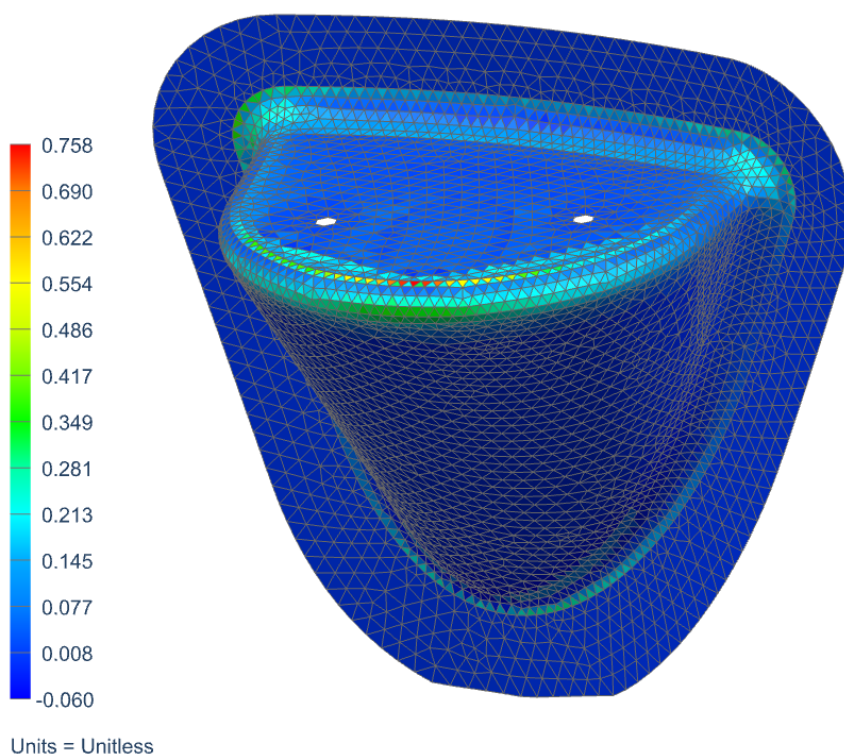
V následující části budou vyhodnoceny jednotlivé případy zatížení pomocí post-procesoru NX PATRAN. Cílem je stanovit součinitele poruchy kompozitní konstrukce na základě Hoffmanova kritéria.

Hodnoty celkových součinitelů poruchy kompozitu od stanovených zatížení jsou uvedeny v Tab. 21. Součinitelé poruchy od vybraných zatížení budou graficky znázorněny.

Zatížení č. 4 – podpěra A

Toto zatížení nastává při záporném poryvovém násobku a cestovní rychlosti (bod obálky č. 12), který vyvolává na podpěře A zápornou reakční sílu v ose Z. Ta se navíc sčítá s reakční silou od krouticího momentu motoru.

Nejvyšší součinitel poruchy má hodnotu 0,758 a to v místě zaoblení dosedací plochy na přechodu mezi skladbou č. 1 a 2.

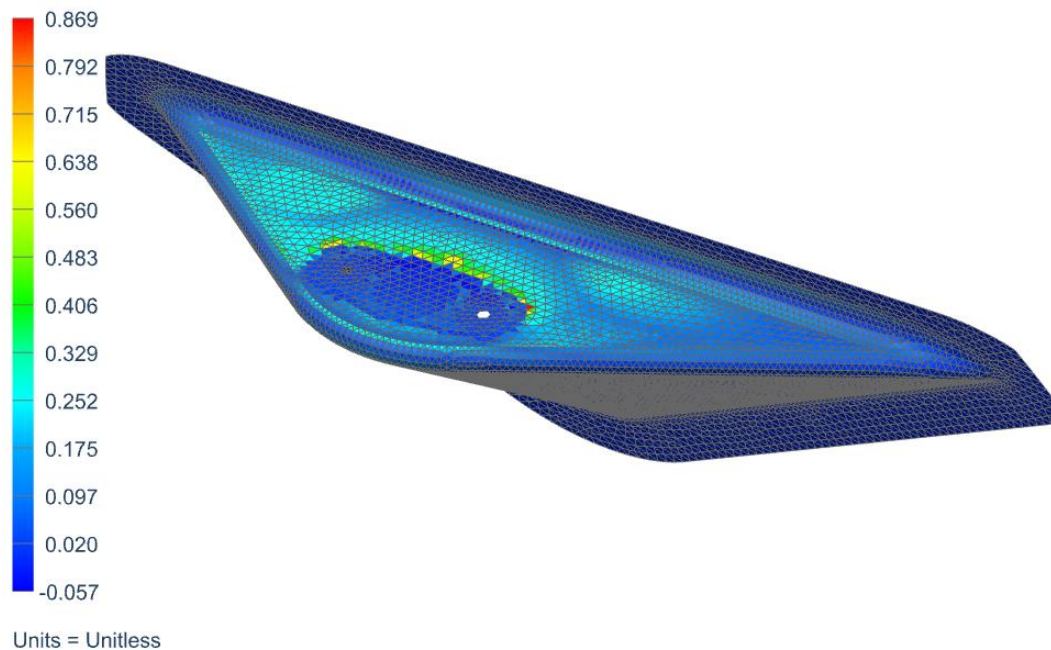


Obr. 47 Součinitel poruchy kompozitu (zatížení č. 4, podpěra A)

Zatížení č. 8 – podpěra B

Tento případ je druh havarijního zatížení (dle předpisu CS-VLA) ve směru osy X. Na toto zatížení byly jednotlivé skladby podpěry B optimalizovány. Ostatní zatížení na této podpěře nevyvolávají tak vysoký součinitel poruchy (viz Tab. 21).

Vysoká koncentrace napětí je v místě zaoblení hrany dosedací plochy a v zaoblení u vetknutého lemování. Nejvyšší součinitel poruchy o velikosti 0,869 má vrstva č. 4 (skelná tkanina).

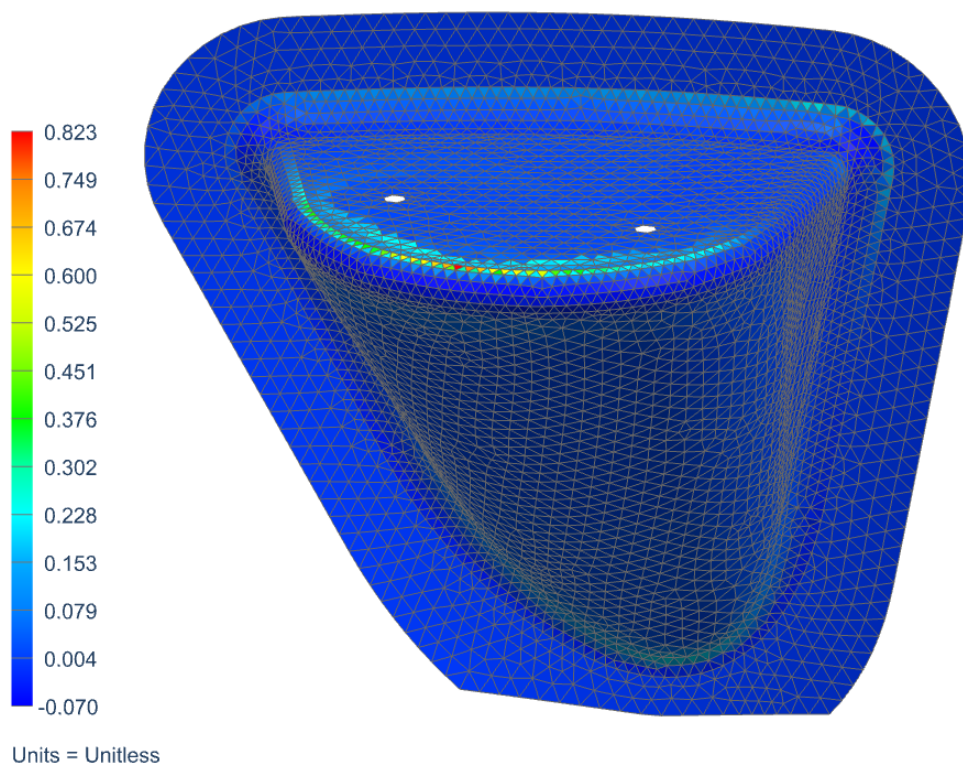


Obr. 48 Součinitel poruchy kompozitu (zatížení č. 8, podpěra B)

Zatížení č. 3 – podpěra C

Zatížení od kladného poryvu při cestovní rychlosti (bod obálky č. 9) spolu se zatížením od kroutícího momentu generuje dominantní tlakovou sílu ve směru osy Z.

Nejvyšší součinitel poruchy o velikosti 0,823 má spodní vrstva č. 11 v místě zaoblení dosedací plochy.



Obr. 49 Součinitel poruchy kompozitu (zatížení č. 3, podpěra C)

Hodnoty součinitelů poruchy kompozitu od jednotlivých zatížení shrnuje následující tabulka. Z těchto hodnot je patrné, že v žádném případě zatížení nedošlo k poškození kompozitu. Materiálová skladba je podle těchto výpočtů dostatečná.

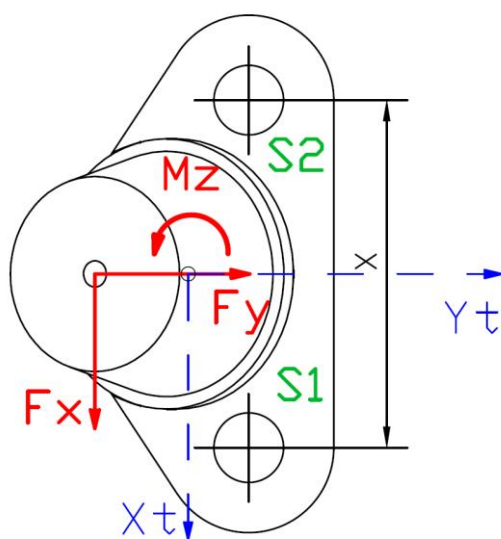
Tab. 21 Celkové součinitele poruchy kompozitu

Součinitel poruchy kompozitu (FI)			
Zatížení	Podpěra A	Podpěra B	Podpěra C
1	0,089	0,170	0,649
2	0,059	0,268	0,672
3	0,085	0,405	0,823
4	0,758	0,239	0,080
5	0,125	0,177	0,652
6	0,109	0,274	0,663
7	0,048	0,118	0,048
8	0,897	0,869	0,508
9	0,125	0,108	0,030

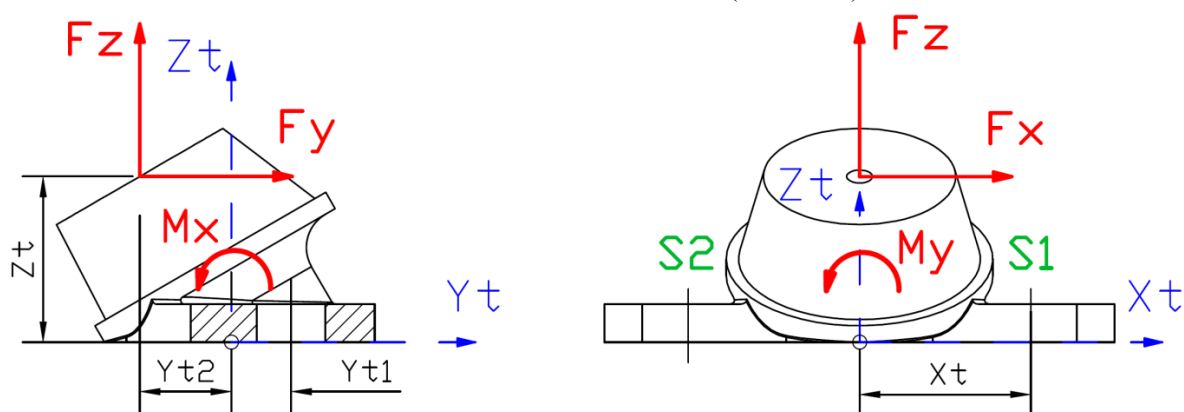
3.5 Pevnostní kontrola šroubů

Silentbloky jsou pomocí dvou šroubů M8 připevněny přes závitové vložky ke kompozitním podpěrám. Síly působící na silentblok zároveň namáhají šrouby kombinovaným zatížením – tahem (tlakem), ohybem a smykem. Mezi kontaktními plochami silentbloku a podpěry působí třecí síla, která nebude ve výpočtu uvažována. Dále bude zaveden předpoklad absolutně tuhého uložení silentbloku (podpěra, přepážka). Jedinými deformovatelnými prvky jsou tak šrouby (mimo pryž). Tento předpoklad je na straně bezpečnosti. Pryž se uvažuje v počátečním stavu (bez deformace). Zároveň neovlivňuje směr ani velikost působících sil.

Podkladem zatížení silentbloku jsou vypočtené reakce motorového lože (v místě šroubového spoje pryže s motorem). Na následujících obrázcích je schematicky znázorněno ve třech rovinách zatížení a geometrické parametry silentbloku na podpěře C.



Obr. 50 Schéma zatížení silentbloku (rovina XY)



Obr. 51 Schéma zatížení silentbloku (roviny YZ a XZ)

Posouvající síly F_x a F_y , namáhající šrouby smykem, doplňuje moment M_z , který působí v rovině spoje. Velikost síly od tohoto momentu v místě šroubového spoje se vypočte podle vztahu:

$$F_{Mz} = F_x \cdot \frac{y_{t2}}{x} \quad (45)$$

Výsledná posouvající síla zatěžující jeden šroub je rovna:

$$S1: F_T = \sqrt{\left(\frac{F_x}{2}\right)^2 + \left(-\frac{F_y}{2} + F_{Mz}\right)^2} \quad (46)$$

$$S2: F_T = \sqrt{\left(\frac{F_x}{2}\right)^2 + \left(-\frac{F_y}{2} - F_{Mz}\right)^2} \quad (47)$$

Smykové napětí šroubu se vypočte podle vztahu:

$$\tau_s = \frac{F_T}{S_3} \quad (48)$$

kde S_3 [mm^2] je plocha řezu šroubu (malý průměr)

Normálové napětí šroubů je generováno silou F_z a dvojicí momentů M_x a M_y . Tyto momenty působí v rovinách kolmých na plochu spoje. Natáčejí rovinu silentbloku vůči rovině podpěry kolem os X_t a Y_t procházejících jeho těžištěm.

Vztahy pro výpočet ohybového momentu M_x (rovina YZ) a M_y (rovina XZ):

$$M_x = F_z \cdot y_{t2} - F_y \cdot z_t \quad (49)$$

$$M_y = F_x \cdot z_t \quad (50)$$

Normálové napětí od ohybových momentů je rovno:

$$\sigma_{Mx} = \frac{M_x}{J_x} \cdot y_{t1} = \frac{M_x}{\sum n_i \cdot S_3 \cdot y_{t1}^2} \cdot y_{t1} \quad (51)$$

$$\sigma_{My} = \frac{M_y}{J_y} \cdot x_t = \frac{M_y}{\sum n_i \cdot S_3 \cdot x_t^2} \cdot x_t \quad (52)$$

kde J_x a J_y [mm^4] jsou momenty setrvačnosti průřezu šroubů k těžištním osám X_T a Z_T , n_i [-] je počet šroubů v i -té řadě.

Výsledné normálové napětí je tvořeno součtem napětí od normálové síly F_z a od ohybových momentů M_x a M_y

$$\sigma_N = \sigma_{Fz} + \sigma_{Mx} + \sigma_{My} = \frac{F_z}{n \cdot S_3} + \frac{M_x}{J_x} \cdot y_{t1} + \frac{M_y}{J_y} \cdot x_t \quad (53)$$

kde n [-] je celkový počet šroubů

Šrouby silentbloků jsou nejvíce namáhány (vyjma havarijních případů) při provozním zatížení č. 6. Proto zde bude uveden jejich výpočet. Pevnostní kontrola šroubů od ostatních zatížení je uvedena v příloze (kap. 7.4).

Na silentblok podpěry C působí síly (zatížení č. 6):

$$F_x = -408 \text{ N}; F_y = 2 \text{ N}; F_z = -2398 \text{ N}$$

Geometrie bočního silentbloku A:

$$x = 90 \text{ mm}; x_t = 45 \text{ mm}; y_{t1} = 16 \text{ mm}; y_{t2} = -24 \text{ mm}; z_t = 43,5 \text{ mm}$$

Výpočet posouvajících sil ve šroubech silentbloku:

$$S1: F_{T1} = \sqrt{\left(\frac{F_x}{2}\right)^2 + \left(-\frac{F_y}{2} - F_{Mz}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{F_x}{2}\right)^2 + \left(-\frac{F_y}{2} - F_x \cdot \frac{y_{t2}}{x}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{-408}{2}\right)^2 + \left(-\frac{2}{2} - (-408) \cdot \frac{-24}{90}\right)^2} = 230,8 \text{ N}$$

$$S2: F_{T2} = \sqrt{\left(\frac{F_x}{2}\right)^2 + \left(-\frac{F_y}{2} + F_{Mz}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{F_x}{2}\right)^2 + \left(-\frac{F_y}{2} + F_x \cdot \frac{y_{t2}}{x}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{-408}{2}\right)^2 + \left(-\frac{2}{2} + (-408) \cdot \frac{-24}{90}\right)^2} = 231,6 \text{ N}$$

Výpočet plochy průřezu šroubu (M8x1,25 - $d_3 = 6,466 \text{ mm}$):

$$S_3 = \frac{\pi \cdot d_3^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 6,466^2}{4} = 32,8 \text{ mm}^2$$

Smykové napětí šroubu je rovno:

$$\tau_{s1} = \frac{F_{T1}}{S_3} = \frac{230,8}{32,8} = 7,0 \text{ Nmm}^{-2}$$

$$\tau_{s2} = \frac{F_{T2}}{S_3} = \frac{231,6}{32,8} = 7,1 \text{ Nmm}^{-2}$$

Stanovení normálových napětí od ohybových momentů:

$$\sigma_{Mx} = \frac{M_x}{\sum n_i \cdot S_3 \cdot y_{t1}^2} \cdot y_{t1} = \frac{F_z \cdot y_{t2} - F_y \cdot z_t}{\sum n_i \cdot S_3 \cdot y_{t1}^2} \cdot y_{t1} =$$

$$= \frac{-2398 \cdot (-24) - 2 \cdot 43,5}{2 \cdot 32,8 \cdot 16^2} \cdot 16 = 54,7 \text{ Nmm}^{-2}$$

$$S1: \sigma_{My} = -\frac{M_y}{J_y} \cdot x_t = -\frac{F_x \cdot z_t}{\sum n_i \cdot S_3 \cdot x_t^2} \cdot x_t = -\frac{-408 \cdot 43,5}{32,8 \cdot 45^2 + 32,8 \cdot 45^2} \cdot 45 = 6,0 \text{ Nmm}^{-2}$$

$$S2: \sigma_{My} = -\frac{M_y}{J_y} \cdot x_t = -\frac{F_x \cdot z_t}{\sum n_i \cdot S_3 \cdot x_t^2} \cdot x_t = -\frac{-408 \cdot 43,5}{32,8 \cdot 45^2 + 32,8 \cdot (-45)^2} \cdot (-45) = -6,0 \text{ Nmm}^{-2}$$

Napětí od normálové síly F_z :

$$\sigma_{Fz} = \frac{F_z}{n \cdot S_3} = \frac{-2398}{2 \cdot 32,8} = -36,5 \text{ Nmm}^{-2}$$

Výpočet výsledného normálového napětí šroubů:

$$S1: \sigma_N = \sigma_{Fz} + \sigma_{Mx} + \sigma_{My} = -36,5 + 54,7 + 6 = 24,2 \text{ Nmm}^{-2}$$

$$S2: \sigma_N = \sigma_{Fz} + \sigma_{Mx} + \sigma_{My} = -36,5 + 54,7 - 6 = 12,2 \text{ Nmm}^{-2}$$

Výpočet maximálního utahovacího momentu šroubu

Navržené šroubové spojení je předepjaté. Tedy při instalaci je spoj utážen na montážní předpětí (Q_0 , vnitřní osová síla). Spoj je tak namáhán aniž by na něj působily vnější provozní síly. Tímto předpětím se zajistí silová vazba mezi stykovými plochami spojovaných součástí a zamezí se tak jejich vzájemnému pohybu během provozu.

Při znalosti vnějšího zatížení, geometrických a materiálových charakteristik šroubů lze určit montážní předpětí z pevnostní podmínky:

$$Q_0 \leq \left(\frac{\sigma_{pt}}{f} - \sigma_N \right) \cdot S_3 \quad (54)$$

kde σ_{pt} je mez pevnosti materiálu šroubu (pro pevnostní třídu 8.8 je $\sigma_{pt} = 800 \text{ Nmm}^{-2}$), f je součinitel bezpečnosti (pro šroubové spoje je $f = 2$), σ_N je nejvyšší provozní tahové napětí

Předpětí spoje je docíleno působením utahovacího momentu na klíči (M_{KK}). Část tohoto momentu překonává třecí moment pod hlavou (M_{TH}) a vlivem části M_Z prostupuje dřík šroubu do závitové vložky. [18]

$$M_{KK} = M_Z + M_{TH} \quad (55)$$

Krouticí moment v dříku šroubu se stanoví podle vzorce:

$$M_Z = Q_0 \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \text{tg}(\gamma + \varphi') \quad (56)$$

kde d_2 je průměr šroubu, γ je úhel stoupání šroubovice a φ' je třecí úhel závitu

$$\text{tg} \gamma = \frac{P}{\pi d_2}; \text{tg} \varphi' = 0,15 \quad (57)$$

kde P je stoupání závitu

Třecí moment pod hlavou šroubu je dán vztahem:

$$M_{TH} = Q_0 \cdot f_H \cdot \rho_H \quad (58)$$

Kde f_H je součinitel tření pod hlavou ($f_H = 0,15$) a ρ_H je třecí poloměr

$$\rho_H = \frac{e + \delta}{4} \quad (59)$$

Kde e je úhlopříčka šestihranu hlavy a δ se vypočte vztahem:

$$\delta \cong d + (1 \div 2) \quad (60)$$

Pro nejvíce zatížený šroub silentbloku platí:

$$\sigma_N = 24,2 \text{ Nmm}^{-2}; S_3 = 32,8 \text{ mm}^2; \delta = 10 \text{ mm}; \rho_H = 6 \text{ mm}; P = 1,25; d_2 = 7,188 \text{ mm}$$

Montážní předpětí je rovno:

$$Q_0 = \left(\frac{\sigma_{pt}}{f} - \sigma_N \right) \cdot S_3 = \left(\frac{800}{2} - 24,2 \right) \cdot 32,8 = 12326,2 \cong 12,3 \text{ kN}$$

Třecí moment pod hlavou šroubu je roven:

$$M_{TH} = Q_0 \cdot f_H \cdot \rho_H = 12300 \cdot 0,15 \cdot 6 = 11070 \text{ Nmm}$$

Výpočet krouticího momentu v dřívku šroubu:

$$\begin{aligned} M_Z &= Q_0 \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \text{tg}(\gamma + \varphi') = Q_0 \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \left(\frac{P}{\pi d_2} + \text{tg}\varphi' \right) = \\ &= 12300 \cdot \frac{7,188}{2} \cdot \left(\frac{1,25}{3,14 \cdot 7,188} + 0,15 \right) = 9080 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

Utahovací moment šroubu je roven:

$$M_{KK} = M_Z + M_{TH} = 11070 + 9080 = 20150 \text{ Nmm} \cong 20 \text{ Nm}$$

Kontrola šroubu na kombinované zatížení tah-smyk

Nejvíce namáhaný šroub je zatížen napětím:

$$\text{Tahovým: } \sigma_n = \frac{Q_0}{S_3} + \sigma_N = \frac{12300}{32,8} + 24,2 = 399,2 \text{ Nmm}^{-2}$$

$$\text{Smykovým: } \tau_s = 7,0 \text{ Nmm}^{-2}$$

Kombinované namáhání lze vyjádřit pomocí redukovaného napětí, pro které platí:

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_n^2 + 3 \cdot \tau_s^2} = \sqrt{399,2^2 + 3 \cdot 7,0^2} = 399,4 \text{ Nmm}^{-2}$$

Pro šroubové spoje je součinitel bezpečnosti dle předpisu roven: $f = 2$

$$\text{Jistota spoje: } j = \frac{\sigma_{dov}}{\sigma_{red}} = \frac{800}{399,4} = 2,003 \geq 2$$

3.6 Pevnostní kontrola lepeného spoje

Navržené motorové lože je k okolní kompozitní konstrukci přilepeno. Lepené spoje obecně vykazují dobrou smykovou pevnost, ale nízkou pevnost v odlupování. Proto je snahou konstrukčně uspořádat spoj tak, aby byl namáhán smykem. V této aplikaci je ale problematické omezení odlupového namáhání. Z toho důvodu bude spoj dodatečně přelaminován tak, aby se zvýšila jeho únosnost.

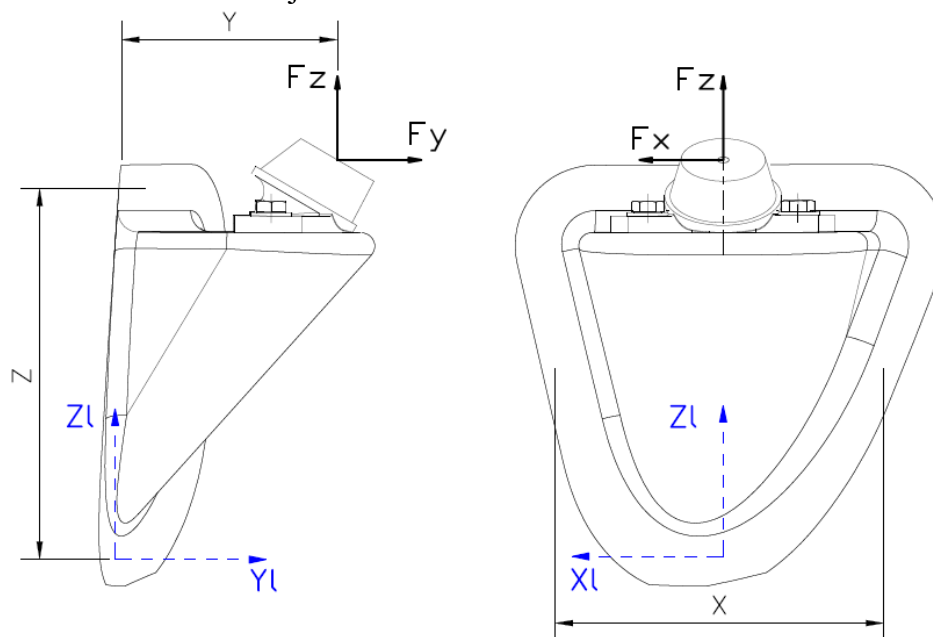
Pevnost lepeného spoje kompozitů ovlivňuje několik aspektů. Posuzuje se orientace vláken krajní vrstvy, která je v kontaktu s lepidlem. Ta by měla být 0° . V opačném případě se snižuje adhezní únosnost smykového spoje a zvyšuje se riziko delaminace. Dále je žádoucí, aby spojované materiály měly obdobnou tuhost. Vyšší tuhostní rozdíly opět snižují pevnost spojení. [19]

Lepidla, používaná na kompozity v letecké aplikaci, jsou převážně na epoxidové bázi ve formě folií nebo tekuté. Fólie zajišťují rovnoměrnou vrstvu lepidla bez rizika jeho absence. Zároveň vykazují dobrou pevnost v odlupování a smykovou únosnost za zvýšené teploty. Na druhé straně vyžadují vyšší stupeň přesnosti výroby, ve smyslu konstantní mezery mezi lepenými částmi. Vytvrzování probíhá za zvýšené teploty a tlaku.

Tekuté formy se mnohdy vytvrzují za pokojové teploty. Nedosahují takových pevností zejména v odlupování a je zde riziko dostatečně neprolepeného spoje. Z těchto důvodů byla zvolena fóliová forma lepidla, jmenovitě LOCTITE EA 9392 AERO. Vlastnosti tohoto lepidla jsou uvedeny v příloze (kap. 7.3).

Pevnostní kontrola lepeného spoje spočívá ve stanovení smykového napětí a síly v odlupování. Tyto hodnoty jsou následně porovnány s dovolenými hodnotami, které udává výrobce. Podkladem pro výpočet je analyticky stanové zatížení jednotlivých podpěr (kap. 3.3.4).

Zatěžující síly působí vzhledem k rovině lepeného spoje na rameni. Spoj je tak namáhán posouvajícími silami (F_x a F_z), normálovou silou (F_y) a ohybovými momenty (M_x , M_y , M_z). Situace je znázorněna na následujícím schématu.



Obr. 52 Schéma zatížení lepeného spoje

Posouvající síly se uvažují rovnoměrně rozdělené po ploše spoje. Tyto síly doplňuje moment M_y působící v rovině spoje. Ten namáhá spoj posouvající silou úměrnou vzdálenosti od osy otáčení, která se předpokládá v rovině symetrie spoje.

Posouvající síla od momentu M_y

$$F_{My} = F_x \cdot \frac{z}{x} \quad (61)$$

Posouvající síla od momentu M_y jednu poloviny spoje přitěžuje a druhou odlehčuje. Z toho důvodu je výpočet celkové posouvající síly rozdělen do dvou částí:

$$F_{T1} = \sqrt{\left(\frac{F_x}{2}\right)^2 + \left(-\frac{F_z}{2} - F_{My}\right)^2}$$

$$F_{T2} = \sqrt{\left(\frac{F_x}{2}\right)^2 + \left(-\frac{F_z}{2} + F_{My}\right)^2} \quad (62)$$

Při znalosti posouvající síly a plochy spoje S_l [mm²] lze stanovit smykové napětí:

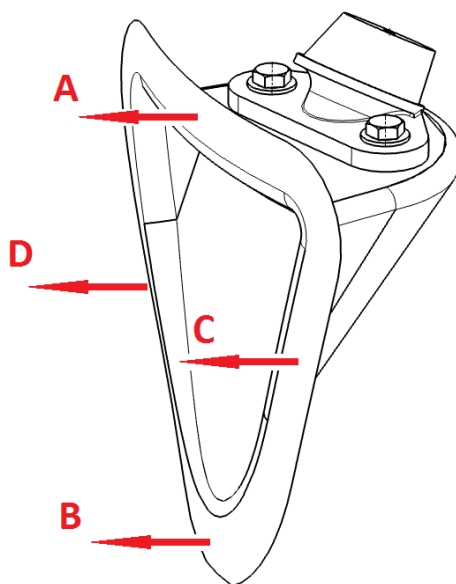
$$\tau_s = \frac{F_T}{S_l} \quad (63)$$

Normálovou sílu F_y doplňují momenty M_x a M_z , které působí kolmo k rovině spoje.

$$F_{Mx} = F_z \cdot \frac{y}{z} \quad (64)$$

$$F_{Mz} = F_x \cdot \frac{y}{x} \quad (65)$$

Spoj je zjednodušeně nahrazen čtyřmi reakcemi, působící kolmo k rovině vetknutí. Výpočtem těchto reakcí se stanoví odlupující síly na jednotlivých hranách lemování. Tyto reakce jsou schematicky znázorněny na následujícím obrázku.



Obr. 53 Normálové reakce spoje

Jednotlivé reakce se stanoví podle následujících vztahů:

$$A = F_y - F_{Mx} \quad (66)$$

$$B = F_{Mx} \quad (67)$$

$$C = \frac{F_y}{2} - F_{Mz} \quad (68)$$

$$D = \frac{F_y}{2} + F_{Mz} \quad (69)$$

Lepený spoj je nejvíce namáhán při dopředném havarijním zatížení (CS-VLA), proto je zde uveden jeho výpočet. Pevnostní kontrola spoje od zbylých zatížení je uvedena v příloze (kap. 7.5).

Na podpěru A při havarijním zatížení působí síly:

$$F_x = 5717 \text{ N}; F_y = -65 \text{ N}; F_z = 647 \text{ N}$$

Ramena sil a velikost plochy spoje byla odměřena v programu NX 8.5.

$$x = 190 \text{ mm}; y = 109 \text{ mm}; z = 220 \text{ mm}; S = 21830 \text{ mm}^2$$

a) Pevnost spoje ve smyku

Velikost posouvající síly od momentu M_y je rovna:

$$F_{My} = F_x \cdot \frac{z}{x} = 5717 \cdot \frac{220}{190} = 6620 \text{ N}$$

Celková posouvající síla je rovna:

$$F_{T1} = \sqrt{\left(\frac{F_x}{2}\right)^2 + \left(-\frac{F_z}{2} - F_{My}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{5717}{2}\right)^2 + \left(-\frac{647}{2} - 6620\right)^2} = 7508,8 \text{ N}$$

$$F_{T2} = \sqrt{\left(\frac{F_x}{2}\right)^2 + \left(-\frac{F_z}{2} + F_{My}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{5717}{2}\right)^2 + \left(-\frac{647}{2} + 6620\right)^2} = 6914,7 \text{ N}$$

Smykové napětí spoje:

$$\tau_{s1} = \frac{F_{T1}}{\frac{S_l}{2}} = \frac{7508,8}{10915} = 0,69 \text{ Nmm}^{-2}$$

$$\tau_{s2} = \frac{F_{T2}}{\frac{S_l}{2}} = \frac{6914,7}{10915} = 0,63 \text{ Nmm}^{-2}$$

Výrobce uvádí u vybraného lepidla pevnost ve smyku za zvýšené teploty (82°C):

$$\tau_{dov} = 27,6 \text{ Nmm}^{-2}$$

Jistota spoje při tomto zatížení se stanoví jako: $j = \frac{\text{dovolené zatížení}}{\text{početní zatížení}} \geq 1$

$$j_1 = \frac{\tau_{dov}}{\tau_{s1}} = \frac{27,6}{0,69} = 40,0 \geq 1$$

$$j_1 = \frac{\tau_{dov}}{\tau_{s1}} = \frac{27,6}{0,63} = 43,8 \geq 1$$

Z výsledku jistoty je patrné, že spoj je ve smyku předimenzovaný, díky velké kontaktní ploše. V případě provozního zatížení musí být jistota spoje $j \geq 1,875$.

b) Pevnost spoje v odlupování

Výpočet sil od momentů působících kolmo na plochu spoje:

$$F_{Mx} = F_z \cdot \frac{y}{z} = 647 \cdot \frac{109}{220} = 321 \text{ Nmm}$$

$$F_{Mz} = F_x \cdot \frac{y}{x} = 5717 \cdot \frac{109}{190} = 3280 \text{ Nmm}$$

Stanovení reakcí na hranách lemování:

$$A = F_y - F_{Mx} = -65 - 321 = -386 \text{ N}$$

$$B = F_{Mx} = 321 \text{ N}$$

$$C = \frac{F_y}{2} - F_{Mz} = \frac{-65}{2} - 3280 = -3312 \text{ N}$$

$$D = \frac{F_y}{2} + F_{Mz} = \frac{65}{2} + 3280 = 3247 \text{ N}$$

Kladné reakce jsou od sil namáhající spoj tahem (odlupem). Výrobce uvádí únosnost lepidla v odlupování jako sílu potřebnou pro odloupení 25 mm širokého pásku (bell peel). U zvoleného lepidla je tato hodnota rovna 240 N/25 mm. To odpovídá 9,6 N/mm.

Navržené podpěry mají průměrnou šířku lemu 25 mm. Z vypočtených reakcí je zřejmé, že převyšují dovolené namáhání. Bude tak třeba dodatečně lemování přelaminovat, aby se zvýšila jeho únosnost.

4. Hmotový rozbor

V této části budou uvedeny hmotnosti motorového lože, motoru a jeho komponentů. Dále bude stanovena poloha jejich těžiště.

4.1 Motor a jeho příslušenství

V následující tabulce jsou uvedeny hmotnosti motoru a jednotlivých komponentů, které tvořily podklad pro výpočet zatížení motorového lože v kap. 3.2. Hmotnosti většiny původních dílů pohonného agregátu jsou převzaty ze zprávy TPZ ULT 35/2014. [15] Hmotnosti nových dílů, použitých v návrhu (v tabulce kurzívou), byly změřeny nebo spočítány v programu NX 8.5.

Tab. 22 Hmotnosti komponentů motoru zatěžující lože

Díl	Hmotnost [kg]
motor-blok (bez víka rozvodů)	67,7
víko rozvodů	1,3
víčka olej. vany	0,4
víčko olej. filtru	0,2
svíčky+průchodky	0,3
<i>výfukové potrubí s tlumičem</i>	3,0
sací kanály (airbox)	2,7
klapka sání	0,9
spouštěč	2,5
<i>filtr sání</i>	0,4
kompresor	2,9
vodní pumpa	1,0
chladič oleje + hadice	1,0
hadice-voda (mimo olej. chlad.)	0,9 (1,2)
<i>hadice-vzduch</i>	0,7 (1,4)
řídící jednotka	0,5
<i>výstupní hřídel</i>	1,8 (3,5)
<i>silentbloky (přední+boční)</i>	0,9
olej	4,0
chladičí kapalina	5,5
Celková hmotnost	98,6

pozn.: Hmotnosti vybraných položek (hadice-voda/vzduch, výstupní hřídel), byly započítány pouze zčásti, neboť zcela nezatěžují konstrukci motorového lože. Hodnoty uvedené v závorce jsou jejich celkové hmotnosti.

Komponenty příslušenství pohonného agregátu, které v návrhu nezatěžují lože, jsou uvedeny v následující tabulce

Tab. 23 Hmotnosti komponentů příslušenství nezatěžující lože

Díl	Hmotnost [kg]
mezichladič	2,6
vodní chladič	1,7
expanzní nádobka	0,2

Těžiště motoru (blok s víkem rozvodů, kompresorem, vodním čerpadlem a chladičem oleje) bylo převzato ze zprávy TPZ ULT 32/2015. [2] Tento bod byl zvolen jako počátek souřadného systému motoru v analytickém výpočtu reakcí.

Výsledné polohy těžiště jsou uvedeny v souřadné soustavě, která se používá při konstrukci letounu.

Tab. 24 Poloha těžiště motoru (blok+kompresor, čerpadlo, olej. chladič)

x_T [mm]	y_T [mm]	z_T [mm]
4760	3	1694

4.2 Motorové lože

Hmotnosti kompozitních podpěr spolu s použitými šrouby a podložkami byly spočteny v programu NX 8.5.

Tab. 25 Hmotnosti komponentů motorového lože

Komponenta	Hmotnost [kg]
Podpěra A + 2x insert	0,20
Podpěra B + 2x insert	0,41
Podpěra C + 2x insert	0,22
Šroub (6x)	0,15
Podložka (6x)	0,04
Celková hmotnost	1,02

Rovněž bylo stanoveno těžiště motorového lože.

Tab. 26 Těžiště motorového lože

x_T [mm]	y_T [mm]	z_T [mm]
4699	-18	1532

Celková hmotnost pohonného agregátu a motorového lože je shrnuta v následující tabulce.

Tab. 27 Celková hmotnost pohonného agregátu

Hmotnost motoru s příslušenstvím [kg]	105,73
Hmotnost motorového lože [kg]	1,02
Celková hmotnost [kg]	106,75

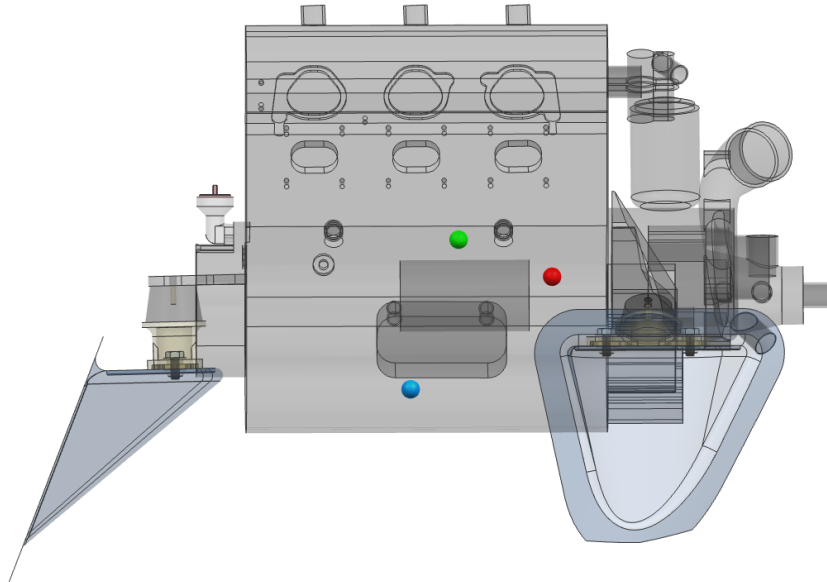
Po zástavbě pohonného agregátu (včetně příslušenství a motorového lože) do draku letounu byla spočítána poloha hmotného středu pomocí programu NX 8.5. Hodnotu uvádí následující tabulka.

Tab. 28 Poloha těžiště pohonného agregátu

x_T [mm]	y_T [mm]	z_T [mm]
4851	2	1654

Zástavbou navržených komponentů došlo k posunu těžiště směrem vzad a dolů. Zároveň byla jeho poloha udržena v rovině symetrie letounu.

Jednotlivé polohy hmotného středu znázorňuje Obr. 54.



Obr. 54 Polohy těžiště (modře-lože, zeleně-motor, červeně-motor+lože+příslušenství)

5. Závěr

Tato práce se zabývala konstrukčním návrhem zástavby motoru Rotax 1503 4-TEC do vyvíjeného letounu UL-39 Albi. V rámci zástavby byly navrženy úpravy jednotlivých motorových systémů tak, aby vyhovovaly provozním požadavkům ultralehkého létání. Prostorové dispozice a hmotnost systémů byly využity při návrhu motorového lože, které tvoří jádro práce.

Motorové lože bylo zvoleno ve variantě kompozitních podpěr, které vykazují příznivý poměr hmotnosti a tuhosti. Zároveň umožňují vhodné uložení motoru, který má odlišnou koncepci závěsů oproti motocyklovým agregátům použitých v propulzním systému letounu.

Na základě stavebních předpisů (UL-2 a CS-VLA) bylo stanoveno zatížení motorového lože, které se odvíjelo od výsledné hmotnosti pohonného agregátu. Dále byla věnována větší pozornost výpočtu reakcí v závěsech motoru, jehož součástí bylo změření tuhosti jednotlivých silentbloků. Na základě vypočtených reakcí byly zvoleny materiálové skladby kompozitních podpěr a následně byla provedena jejich pevnostní kontrola. Podpěry vyhověly, dle zvoleného kritéria porušení kompozitu, všem případům zatížení. Kontrolovány byly rovněž šrouby upevňující silentbloky k podpěrám a lepené spoje mezi ložem a okolní konstrukcí. Problematické je u lepeného spoje zatížení silou v odlupování, která překračuje dovolenou hodnotu. Z toho důvodu bude pravděpodobně nutné spoj dodatečně přelaminovat tak, aby se zvýšila jeho únosnost.

Na závěr byla stanovena výsledná hmotnost pohonného agregátu včetně lože a určena poloha jejich těžiště.

6. Seznam použité literatury

- [1] **Konopiský.** *Motorové lože malého sportovního letounu. Diplomová práce.* Praha : ČVUT, 2008.
- [2] **Helmich, Martin a Sommer, Tomáš.** Konstrukční úpravy motoru pro pohon ventilátoru. *Technická zpráva ULT č. TZP/ULT/32/2015.* Praha : Ústav letadlové techniky ČVUT Praha, 2015.
- [3] **Bombardier Recreational Products Inc.** *2012 4-TECH SHOP MANUAL.* Valcourt QC Canada : autor neznámý, 2012.
- [4] **Helmich, Martin a Sommer, Tomáš.** Výkonové charakteristiky pohonného agregátu. *Technická zpráva ULT č. TZP/ULT/23/15.* Praha : Ústav letadlové techniky ČVUT Praha, 2015. stránky 14-17.
- [5] **Bombardier Recreational Products Inc.** *2008 4-TECH SHOP MANUAL.* Valcourt : autor neznámý, 2008.
- [6] **Adamec, Petr a Kocáb, Jindřich.** *Letadlové motory.* Praha : Corona spol. s.r.o., 2008. 978-80-86116-54-9.
- [7] K&N RU-3103HBK Universal Clamp-On Air Filter. *K&N.* [Online] [Citace: 26. 4 2017.] <https://www.knfilters.com/search/product.aspx?prod=RU-3103HBK>.
- [8] Intercooler 300x155x65. *FMIC.CZ PERFORMANCE.* [Online] [Citace: 20. 4 2017.] <http://fmic.cz/standardni/475-intercooler-550x140x65mm.html>.
- [9] **Pekárek, Stanislav.** T 14 Chlazení motorů, údržba, opravy chladicích soustav. *Technologie oprav I.* [Online] 2016. [Citace: 22. 6 2017.] <https://publi.cz/books/160/14.html>. 978-80-88058-23-6.
- [10] Torx Racing Products. *Torx Racing.* [Online] Volusion, 2016. [Citace: 2. 5 2016.] <http://www.torxracing.com/>.
- [11] See Doo Performance Parts. *PWCPerformance.com.* [Online] Mike Trinastich, 2016. [Citace: 2. 5 2016.] <https://www.4-tecperformance.com/index.php?cPath=18&>.
- [12] **Letecká amatérská asociace.** *Předpis UL 2 - I.část (Požadavky letové způsobilosti SLZ. Ultralehké letouny řízené aerodynamicky).* Praha : autor neznámý, 2002.
- [13] **Evropská agentura pro bezpečnost letectví.** *Certifikační specifikace pro velmi lehké letouny (CS-VLA).*
- [14] **Lapiš, Marek.** *Motorové lože pro malý sportovní letoun. Diplomová práce.* Praha : autor neznámý, 2003.
- [15] **Helmich, Martin a Sommer, Tomáš.** Koncepční studie pohonného agregátu. *Technická zpráva ULT č. TZP/ULT/35/14.* Praha : Ústav letadlové techniky ČVUT Praha, 2014.
- [16] **Růžičková, Irena a Hlavička, Rudolf.** Numerické metody. *Katedra fyziky FSI VUT.* [Online] [Citace: 2017. 2 5.] <http://physics.ujep.cz/~jskvor/NME/DalsiSkripta/Numerika.pdf>.
- [17] **Krystek, Jan.** *Pevnostní kritéria pro kompozitní materiály.* Plzeň : autor neznámý, 2012.
- [18] **Švec, Vladimír.** *Části a mechanismy strojů.* Praha : ČVUT, 1997. 9788001017012.
- [19] **Fláška, Miroslav a Štekner, Bedřich.** *Speciální letecké technologie.* Praha : ČVUT, 1996. 80-01-01419-3.
- [20] **Valášek, Michael, Bauma, Václav a Šika, Zbyněk.** *Mechanika B.* Praha : ČVUT, 2004. 8001029190.

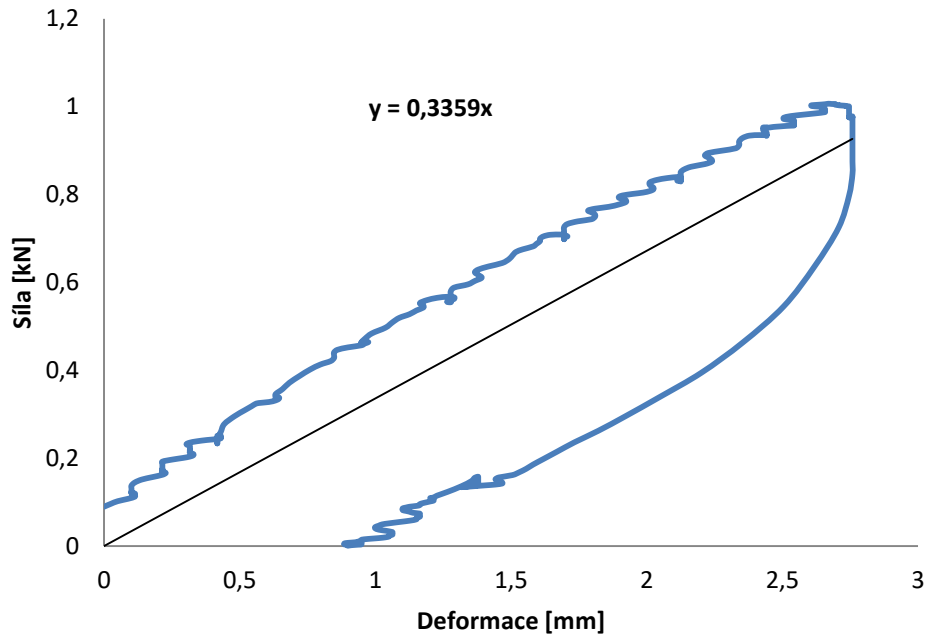
- [21] **Valášek, Michael, Stejskal, Vladimír a Březina, Jiří.** *Mechanika A.* Praha : ČVUT, 2004. 8001028909.
- [22] **Henkel AG & Co. KGaA.** Aerospace Product Selector Guide. *Henkel aerospace.* [Online] 2016. [Citace: 2017. 6 30.] http://www.henkel-adhesives.com/com/content_data/401160_Henkel_Aero_Structural_Adhesives_Products.pdf.

7. Přílohy

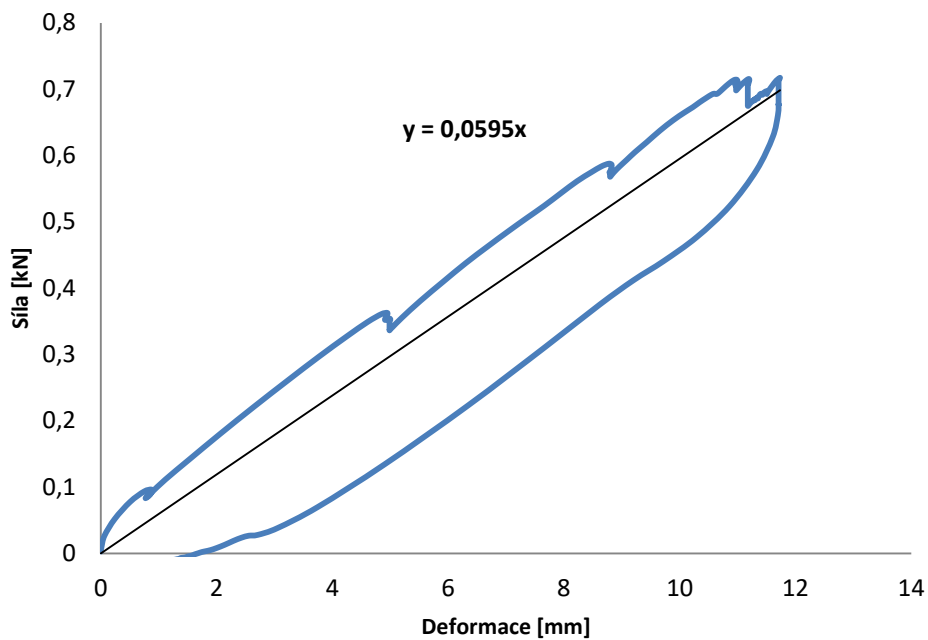
7.1 Změřené tuhostní charakteristiky silentbloků

7.1.1 Přední silentblok (závěs B)

a. Tuhost ve směru osy Z



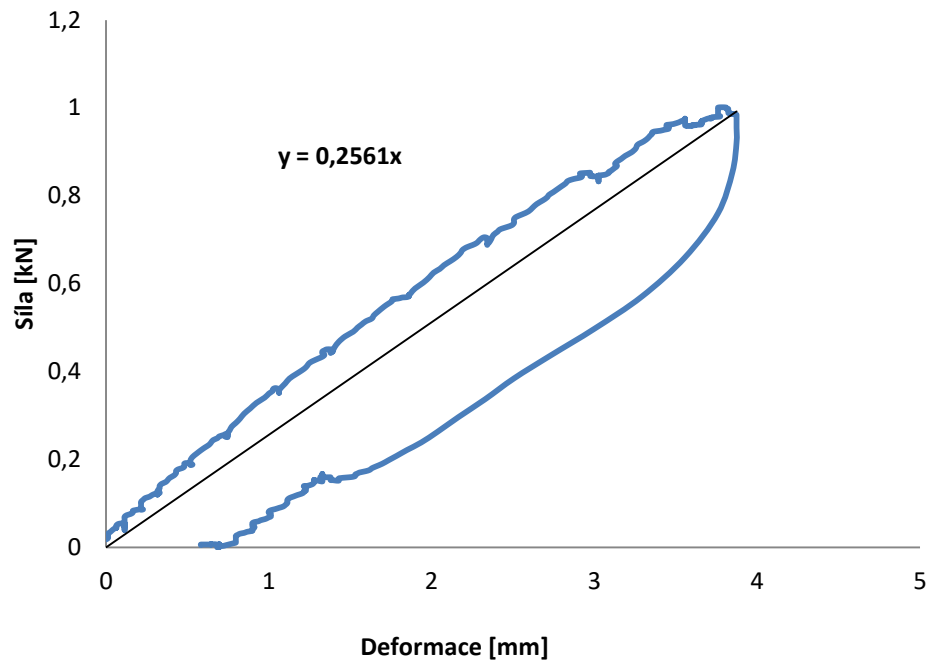
b. Tuhost ve směru os X a Y (symetrický silentblok)



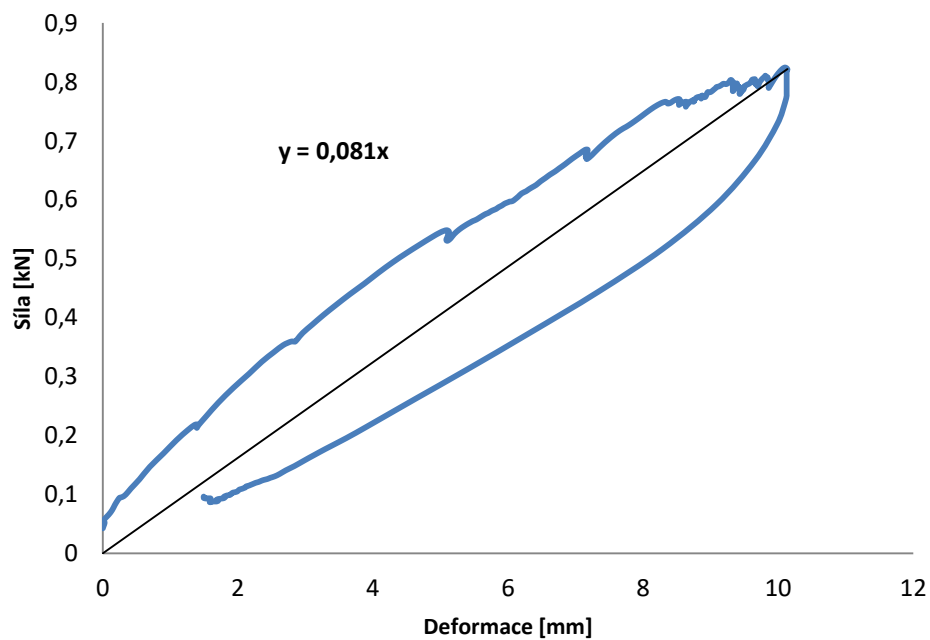
7.1.2 Boční silentblok (závěs A a C)

7.1.2.1 Pootočená základna o úhel $\varphi_X = 30^\circ$

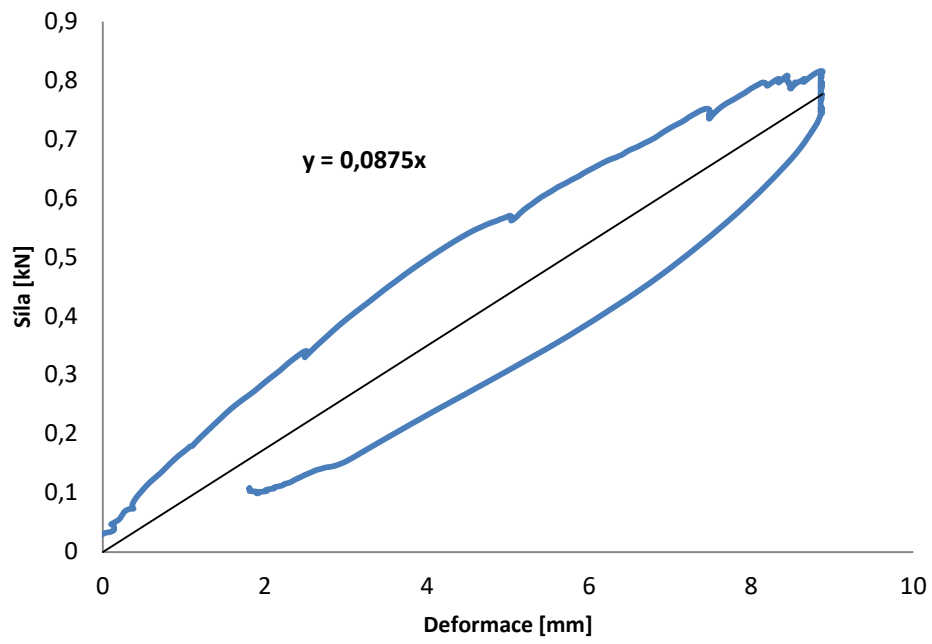
a. Tuhost ve směru osy Z



b. Tuhost ve směru osy X

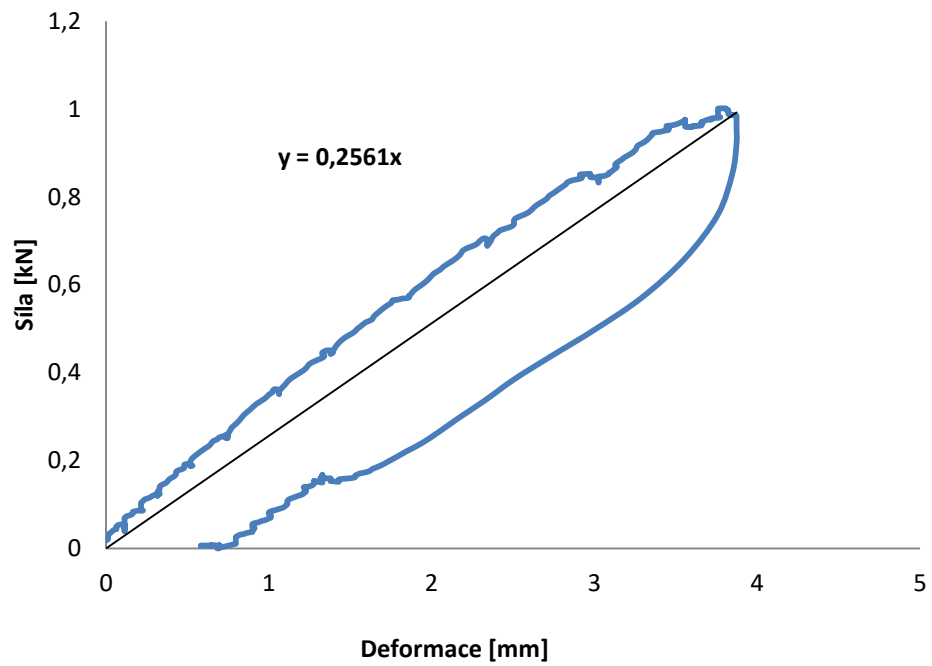


c. Tuhost ve směru osy Y

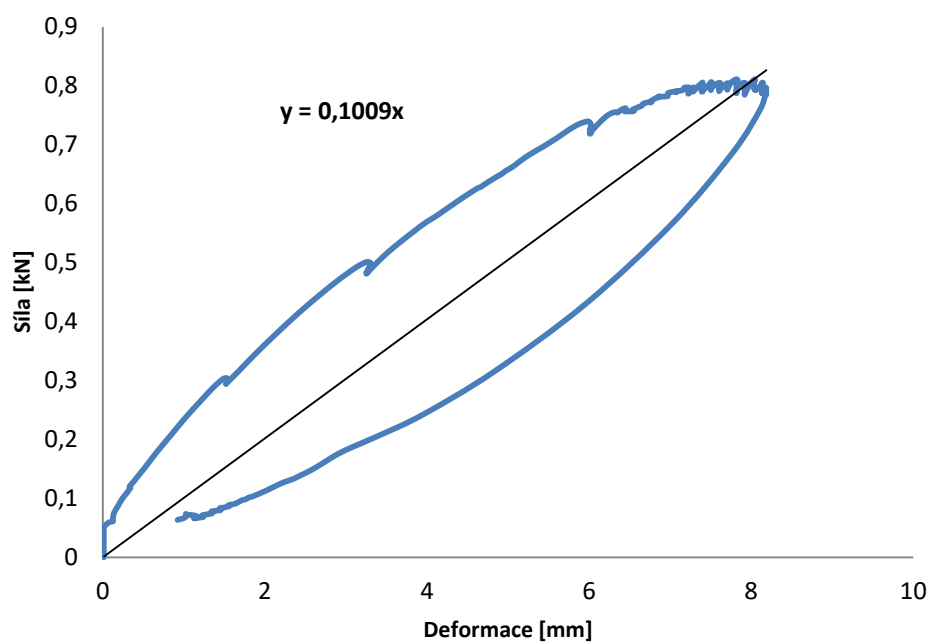


7.1.2.2 Vodorovná základna

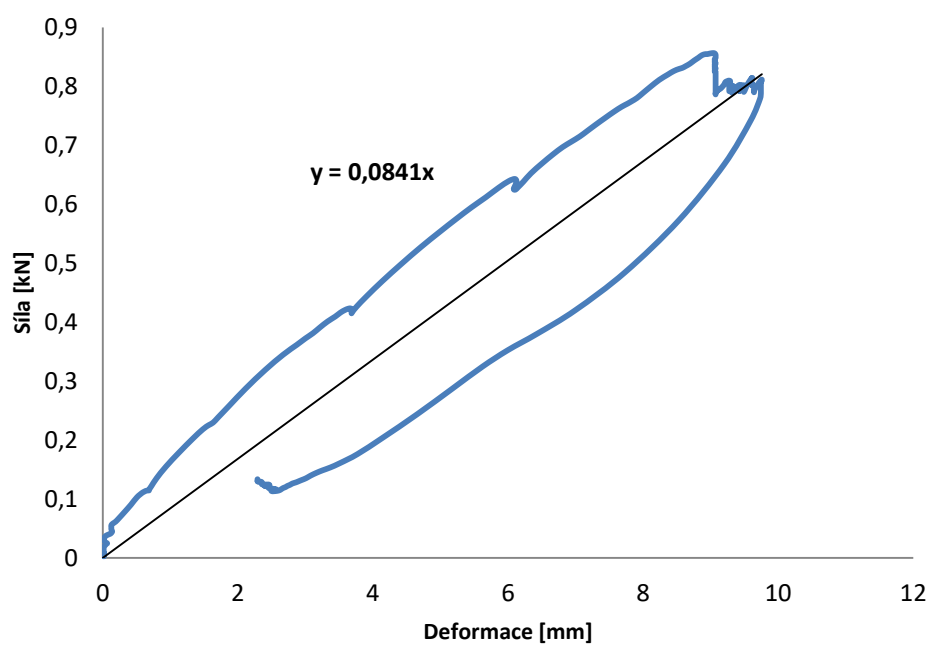
a. Tuhost ve směru osy Z



b. Tuhost ve směru osy X



c. Tuhost ve směru osy Y



7.2 Zdrojový kód analytického výpočtu reakcí (Matlab R2012b)

```
clear

G = [-;-;-;0];           % Zadání zatěžující sily [kN] (podle souřad. systému)
Mk = [-;-;-;0];         % Zadání krouticího momentu [Nm] (kladná hodnota)

KA = [101; 84; 256; 1];
KC = KA;
KB = [60; 60; 336; 1];

r2A = [-204.425; -211.777; -64.672; 1];
r2B = [308.010; 47.851; -49.534; 1];
r2C = [-204.776; 204.313; -64.672; 1];
r2CG = [-253.812; 2.859; -93.669];

r1A = [295.575; 288.223; 435.328; 1];
r1B = [808.010; 547.851; 450.466; 1];
r1C = [295.224; 704.313; 435.328; 1];

syms x1 x2 x3 x4 x5 x6
X = [x1; x2; x3; x4; x5; x6];

cpx = cos(x1);
cpy = cos(x2);
cpz = cos(x3);
spx = sin(x1);
spy = sin(x2);
spz = sin(x3);

r1CG = [x4; x5; x6];

Spx = [1 0 0; 0 cpx -spx; 0 spx cpx];
Spy = [cpy 0 spy; 0 1 0; -spy 0 cpy];
Spz = [cpz -spz 0; spz cpz 0; 0 0 1];

S = Spx*Spy*Spz;
T12 = [S r1CG; [0 0 0 1]];

A = eye(3,3);
T34 = [S r2CG; [0 0 0 1]];

r1Am = T12*r2A;
r1Bm = T12*r2B;
r1Cm = T12*r2C;

Mkp = T34*Mk;

FA = -KA.*(r1Am-r1A);
FB = -KB.*(r1Bm-r1B);
FC = -KC.*(r1Cm-r1C);

Mkm = T12*Mk;

f1 = FA(1:3) + FB(1:3) + FC(1:3) + G(1:3);
f2 = cross(r2A(1:3),FA(1:3))+cross(r2B(1:3),FB(1:3))+cross(r2C(1:3),FC(1:3))-Mkp(1:3);
```

```

F = [f1; f2];
J = jacobian(F, X);
X0 = [0;0;0;500;500;500];      %odhad řešení

J0 = subs(J, {x1,x2,x3,x4,x5,x6},{X0(1),X0(2),X0(3),X0(4),X0(5),X0(6)});
F0 = subs(F, {x1,x2,x3,x4,x5,x6},{X0(1),X0(2),X0(3),X0(4),X0(5),X0(6)});
D0 = J0 \ (- F0);
X1 = X0 + D0;

J1 = subs(J, {x1,x2,x3,x4,x5,x6},{X1(1),X1(2),X1(3),X1(4),X1(5),X1(6)});
F1 = subs(F, {x1,x2,x3,x4,x5,x6},{X1(1),X1(2),X1(3),X1(4),X1(5),X1(6)});
D1 = J1 \ (- F1);
X2 = X1 + D1;

J2 = subs(J, {x1,x2,x3,x4,x5,x6},{X2(1),X2(2),X2(3),X2(4),X2(5),X2(6)});
F2 = subs(F, {x1,x2,x3,x4,x5,x6},{X2(1),X2(2),X2(3),X2(4),X2(5),X2(6)});
D2 = J2 \ (- F2);
X3 = X2 + D2;

J3 = subs(J, {x1,x2,x3,x4,x5,x6},{X3(1),X3(2),X3(3),X3(4),X3(5),X3(6)});
F3 = subs(F, {x1,x2,x3,x4,x5,x6},{X3(1),X3(2),X3(3),X3(4),X3(5),X3(6)});
D3 = J3 \ (- F3);
X4 = X3 + D3;

X = subs(X4,{X3(1),X3(2),X3(3),X3(4),X3(5),X3(6)}, {x1,x2,x3,x4,x5,x6});

x1 = X(1,1);
x2 = X(2,1);
x3 = X(3,1);
x4 = X(4,1);
x5 = X(5,1);
x6 = X(6,1);

cpx = cos(x1);
cpy = cos(x2);
cpz = cos(x3);
spx = sin(x1);
spy = sin(x2);
spz = sin(x3);

r1CG = [x4; x5; x6];

Spx = [1 0 0; 0 cpx -spx; 0 spx cpx];
Spy = [cpy 0 spy; 0 1 0; -spy 0 cpy];
Spz = [cpz -spz 0; spz cpz 0; 0 0 1];

S = Spx*Spy*Spz;
T12 = [S r1CG; [0 0 0 1]];

r1Am = T12*r2A;
r1Bm = T12*r2B;
r1Cm = T12*r2C;

dr1A = (r1Am-r1A)*1000;
dr1B = (r1Bm-r1B)*1000;
dr1C = (r1Cm-r1C)*1000;

```

```

disp ('delta X(A) [mm] '), disp (dr1A (1,1));
disp ('delta Y(A) [mm] '), disp (dr1A (2,1));
disp ('delta Z(A) [mm] '), disp (dr1A (3,1));
disp ('delta X(B) [mm] '), disp (dr1B (1,1));
disp ('delta Y(B) [mm] '), disp (dr1B (2,1));
disp ('delta Z(B) [mm] '), disp (dr1B (3,1));
disp ('delta X(C) [mm] '), disp (dr1C (1,1));
disp ('delta Y(C) [mm] '), disp (dr1C (2,1));
disp ('delta Z(C) [mm] '), disp (dr1C (3,1));

```

```

FA = (-KA.*(r1Am-r1A))*1000;
FB = (-KB.*(r1Bm-r1B))*1000;
FC = (-KC.*(r1Cm-r1C))*1000;

```

```

disp ('FX(A) [N] '), disp (FA (1,1));
disp ('FY(A) [N] '), disp (FA (2,1));
disp ('FZ(A) [N] '), disp (FA (3,1));
disp ('FX(B) [N] '), disp (FB (1,1));
disp ('FY(B) [N] '), disp (FB (2,1));
disp ('FZ(B) [N] '), disp (FB (3,1));
disp ('FX(C) [N] '), disp (FC (1,1));
disp ('FY(C) [N] '), disp (FC (2,1));
disp ('FZ(C) [N] '), disp (FC (3,1));

```

7.3 Vlastnosti použitých materiálů (kompozitní podpěry) a lepidla

Tab. 29 Materiály skladby kompozitních podpěr

Materiál	Uhlík-tkanina	Sklo-tkanina	Překližka
Hustota [kg/m ³]	1550	1800	350
E [N/mm ²]	61562	24569	11600
E2 [N/mm ²]	61562	21194	9400
E3 [N/mm ²]	7312	-	-
μ [-]	0,062	0,164	0,3
μ 23 [-]	0,062	0,139	-
μ 13 [-]	0,03	0,15	-
G [N/mm ²]	4207	15364	1000
G13 [N/mm ²]	4207	15364	600
G23 [N/mm ²]	2100	3300	-
Pevnost v tahu (ST) [N/mm ²]	656	509	75
Pevnost v tahu (ST2) [N/mm ²]	656	418	75
Pevnost v tahu (ST3) [N/mm ²]	46	100	-
Pevnost v tlaku (SC) [N/mm ²]	500	336	55
Pevnost v tlaku (SC2) [N/mm ²]	500	336	55
Pevnost v tlaku (SC3) [N/mm ²]	90	120	-
Pevnost ve smyku (SS) [N/mm ²]	57	57	18

Tab. 30 Vlastnosti lepidla

Lepidlo	LOCTITE EA 9628 AERO (Hysol EA 9628)
Teplota vytvrzování [°C]	121
Doba vytvrzování [min]	90
Provozní teplota [°C]	121
Síla v odlupování [N/25mm]	240
Pevnost ve smyku (82°C) [N/mm ²]	27,6
Tg [°C]	120
Pevnost v tahu [N/mm ²]	51,7
Modul pružnosti v tahu [N/mm ²]	2377
Poměrné prodloužení [%]	7,5
Pevnost v tlaku [N/mm ²]	79,3

7.4 Pevnostní kontrola šroubů

silentblok	xt [mm]	x [mm]	yt1 [mm]	yt2 [mm]	zt [mm]	Jx [mm ⁴]	Jy [mm ⁴]
A	45	90	-16	24	43,5	16812,5	132989,2
C	45	90	16	-24	43,5	16812,5	132989,2
B	0	0	-45	45	80	132989,2	0,0

Silentblok podpěry A

Zatížení		Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Mx [Nmm]	My [Nmm]	Mz [Nmm]	Ft (S1) [N]	Ft (S2) [N]	τ (S1) [MPa]	τ (S2) [MPa]	σ _{MX} [MPa]	σ _{MY} (S1) [MPa]	σ _{MY} (S2) [MPa]	σ _{FZ} [MPa]	σ _N (S1) [MPa]	σ _N (S2) [MPa]	σ _{RED} (S1) [MPa]	σ _{RED} (S2) [MPa]	Jistota (S1)[-]	Jistota (S2)[-]
Provozní zatížení	1	-213	-2	567	13695,0	-9265,5	-5112	120,2	121,2	3,7	3,7	-13,0	3,1	-3,1	8,6	-1,3	-7,5	373,8	367,5	2,14	2,18
	2	-279	0	23	552,0	-12136,5	-6696	158,1	158,1	4,8	4,8	-0,5	4,1	-4,1	0,4	3,9	-4,3	379,0	370,8	2,11	2,16
	3	-189	-1	-453	-10828,5	-8221,5	-4536	106,9	107,3	3,3	3,3	10,3	2,8	-2,8	-6,9	6,2	0,6	381,2	375,7	2,10	2,13
	4	-207	-2	2448	58839,0	-9004,5	-4968	116,8	117,8	3,6	3,6	-56,0	3,0	-3,0	37,3	-15,7	-21,8	359,4	353,3	2,23	2,26
	5	-336	0	578	13896,7	-14596,7	-8053	190,0	190,3	5,8	5,8	-13,2	4,9	-4,9	8,8	0,5	-9,4	375,7	365,8	2,13	2,19
	6	-443	2	39	850,7	-19256,0	-10624	251,3	250,4	7,7	7,6	-0,8	6,5	-6,5	0,6	6,3	-6,7	381,5	368,5	2,10	2,17
	7	96	425	185	-14045,3	4195,3	2315	192,9	243,0	5,9	7,4	13,4	-1,4	1,4	2,8	14,8	17,6	389,9	392,8	2,05	2,04
Havarijní zatížení	X (15g)	5717	-65	647	18355,5	248689,5	137208	3255,1	3224,5	99,1	98,2	-17,5	-84,1	84,1	9,9	-91,8	76,5	331,2	482,5	2,42	1,66
	Y (-3g)	-217	-957	-416	31645,5	-9439,5	-5208	434,4	547,2	13,2	16,7	-30,1	3,2	-3,2	-6,3	-33,3	-39,6	342,5	336,6	2,34	2,38
	Y (3g)	217	956	416	-31602,0	9439,5	5208	433,9	546,7	13,2	16,7	30,1	-3,2	3,2	6,3	33,2	39,6	408,9	415,6	1,96	1,92
	Z (-4,5g)	1	0	-1484	-35616,0	43,5	24	0,6	0,6	0,0	0,0	33,9	0,0	0,0	-22,6	11,3	11,3	386,3	386,3	2,07	2,07
	Z (4,5g)	-1	0	1484	35616,0	-43,5	-24	0,6	0,6	0,0	0,0	-33,9	0,0	0,0	22,6	-11,3	-11,3	363,7	363,7	2,20	2,20

Silentblok podpěry C

Zatížení		Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Mx [Nmm]	My [Nmm]	Mz [Nmm]	Ft (S1) [N]	Ft (S2) [N]	τ (S1) [MPa]	τ (S2) [MPa]	σ_{MX} [MPa]	σ_{MY} (S1) [MPa]	σ_{MY} (S2) [MPa]	σ_{FZ} [MPa]	σ_N (S1) [MPa]	σ_N (S2) [MPa]	σ_{RED} (S1) [MPa]	σ_{RED} (S2) [MPa]	Jistota (S1)[-]	Jistota (S2)[-]
Provozní zatížení	1	-185	-2	-2343	56319,0	-8047,5	-4440,0	105,3	104,4	3,2	3,2	53,6	2,7	-2,7	-35,7	20,6	15,2	395,7	390,2	2,02	2,05
	2	-252	0	-2392	57408,0	-10962,0	-6048,0	142,8	142,8	4,3	4,3	54,6	3,7	-3,7	-36,4	21,9	14,5	397,0	389,6	2,02	2,05
	3	-166	-1	-2746	65947,5	-7221,0	-3984,0	94,3	93,8	2,9	2,9	62,8	2,4	-2,4	-41,8	23,4	18,5	398,4	393,5	2,01	2,03
	4	-178	-2	-536	12951,0	-7743,0	-4272,0	101,3	100,4	3,1	3,1	12,3	2,6	-2,6	-8,2	6,8	1,5	381,8	376,6	2,10	2,12
	5	-302	0	-2347	56350,0	-13146,7	-7253,3	171,4	171,2	5,2	5,2	53,6	4,4	-4,4	-35,7	22,3	13,4	397,4	388,5	2,01	2,06
	6	-408	2	-2398	57469,3	-17748,0	-9792,0	230,8	231,6	7,0	7,1	54,7	6,0	-6,0	-36,5	24,2	12,2	399,4	387,4	2,00	2,07
	7	-86	425	-184	-14056,0	-3731,3	-2058,7	194,4	239,2	5,9	7,3	-13,4	1,3	-1,3	-2,8	-14,9	-17,4	360,2	357,8	2,22	2,24
Havarijní zatížení	X (15g)	5472	-65	1086	-23236,5	238032,0	131328,0	3085,6	3116,2	94,0	94,9	-22,1	-80,5	80,5	16,5	-86,1	75,0	331,6	479,0	2,41	1,67
	Y (-3g)	193	-956	-415	51546,0	8395,5	4632,0	437,3	538,2	13,3	16,4	49,1	-2,8	2,8	-6,3	39,9	45,6	415,5	421,5	1,93	1,90
	Y (3g)	-193	956	-415	-31626,0	-8395,5	-4632,0	437,3	538,2	13,3	16,4	-30,1	2,8	-2,8	-6,3	-33,6	-39,3	342,2	336,9	2,34	2,37
	Z (-4,5g)	-1	0	-1132	27168,0	-43,5	-24,0	0,6	0,6	0,0	0,0	25,9	0,0	0,0	-17,2	8,6	8,6	383,6	383,6	2,09	2,09
	Z (4,5g)	1	0	1132	-27168,0	43,5	24,0	0,6	0,6	0,0	0,0	-25,9	0,0	0,0	17,2	-8,6	-8,6	366,4	366,4	2,18	2,18

Silentblok podpěry B

Zatížení		Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Mx [Nmm]	My [Nmm]	Mz [Nmm]	Ft (S1) [N]	Ft (S2) [N]	τ (S1) [MPa]	τ (S2) [MPa]	σ_{MX} (S1) [MPa]	σ_{MX} (S2) [MPa]	σ_{MY} [MPa]	σ_{FZ} [MPa]	σ_N (S1) [MPa]	σ_N (S2) [MPa]	σ_{RED} (S1) [MPa]	σ_{RED} (S2) [MPa]	Jistota (S1)[-]	Jistota (S2)[-]
Provozní zatížení	1	-119	3	-1079	-240,0	-9520,0	0,0	59,5	59,5	1,8	1,8	0,1	-0,1	0,0	-16,4	-16,3	-16,5	358,7	358,5	2,23	2,23
	2	-158	0	-1438	0,0	-12640,0	0,0	79,0	79,0	2,4	2,4	0,0	0,0	0,0	-21,9	-21,9	-21,9	353,1	353,1	2,27	2,27
	3	-106	2	-2034	-160,0	-8480,0	0,0	53,0	53,0	1,6	1,6	0,1	-0,1	0,0	-31,0	-30,9	-31,0	344,1	344,0	2,32	2,33
	4	-115	4	1368	-320,0	-9200,0	0,0	57,5	57,5	1,8	1,8	0,1	-0,1	0,0	20,8	20,9	20,7	396,0	395,7	2,02	2,02
	5	-190	0	-1012	-35,6	-15217,8	0,0	95,1	95,1	2,9	2,9	0,0	0,0	0,0	-15,4	-15,4	-15,4	359,6	359,6	2,22	2,22
	6	-253	-4	-1349	284,4	-20266,7	0,0	126,7	126,7	3,9	3,9	-0,1	0,1	0,0	-20,5	-20,6	-20,4	354,4	354,6	2,26	2,26
	7	-11	440	0	-35200,0	-853,3	0,0	220,1	220,1	6,7	6,7	11,9	-11,9	0,0	0,0	11,9	-11,9	387,1	363,3	2,07	2,20
Havarijní zatížení	X (15g)	3321	129	-1733	-10320,0	265680,0	0,0	1661,8	1661,8	50,6	50,6	3,5	-3,5	0,0	-26,4	-22,9	-29,9	362,9	356,1	2,20	2,25
	Y (-3g)	24	-990	1	79200,0	1920,0	0,0	495,1	495,1	15,1	15,1	-26,8	26,8	0,0	0,0	-26,8	26,8	349,2	402,7	2,29	1,99
	Y (3g)	24	990	-1	-79200,0	1920,0	1,0	495,2	495,1	15,1	15,1	26,8	-26,8	0,0	0,0	26,8	-26,8	402,6	349,2	1,99	2,29
	Z (-4,5g)	0	-1	-1737	80,0	0,0	2,0	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-26,4	-26,5	-26,4	348,5	348,6	2,30	2,30
	Z (4,5g)	0	1	1737	-80,0	0,0	3,0	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	26,4	26,5	26,4	401,5	401,4	1,99	1,99

7.5 Pevnostní kontrola lepeného spoje

Podpěra	x [mm]	y [mm]	z [mm]	S [mm ²]
A	190	109	220	21830
B	80	400	235	42060
C	180	130	230	21650

Podpěra A

Zatížení		F _x [N]	F _y [N]	F _z [N]	F _{Mx} [N]	F _{My} [N]	F _{Mz} [N]	A [N]	B [N]	C [N]	D [N]	F _{T1} [N]	F _{T2} [N]	τ ₁ [Nmm ⁻²]	τ ₂ [Nmm ⁻²]	Jistota 1 [-]	Jistota 2 [-]
Provozní zatížení	1	-213	-2	567	280,9	-247	-122,2	-282,9	280,9	121,2	-123,2	112,7	540,7	0,01	0,05	2673,0	557,1
	2	-279	0	23	11,4	-323	-160,1	-11,4	11,4	160,1	-160,1	341,4	362,5	0,03	0,03	882,5	831,1
	3	-189	-1	-453	-224,4	-219	-108,4	223,4	-224,4	107,9	-108,9	455,3	94,8	0,04	0,01	661,7	3177,5
	4	-207	-2	2448	1212,9	-240	-118,8	-1214,9	1212,9	117,8	-119,8	989,7	1467,3	0,09	0,13	304,4	205,3
	5	-336	0	578	286,5	-389	-192,5	-286,9	286,5	192,3	-192,7	195,0	698,1	0,02	0,06	1544,7	431,5
	6	-443	2	39	19,2	-513	-254,0	-17,4	19,2	254,8	-253,1	540,6	576,1	0,05	0,05	557,2	522,9
	7	96	425	185	91,6	112	55,3	333,3	91,6	157,1	267,8	209,7	51,9	0,02	0,00	1436,3	5802,9
Havarijní zatížení	X (15g)	5717	-65	647	320,6	6620	3279,8	-385,6	320,6	-3312,3	3247,3	7508,6	6914,7	0,69	0,63	40,1	43,6
	Y (-3g)	-217	-957	-416	-206,1	-251	-124,5	-750,9	-206,1	-354,0	-603,0	471,9	116,8	0,04	0,01	638,4	2579,1
	Y (3g)	217	956	416	206,1	251	124,5	749,9	206,1	353,5	602,5	471,9	116,8	0,04	0,01	638,4	2579,1
	Z (-4,5g)	1	0	-1484	-735,3	1	0,6	735,3	-735,3	-0,6	0,6	740,8	743,2	0,07	0,07	406,6	405,4
	Z (4,5g)	-1	0	1484	735,3	-1	-0,6	-735,3	735,3	0,6	-0,6	740,8	743,2	0,07	0,07	406,6	405,4

Podpěra B

Zatížení		F _x [N]	F _y [N]	F _z [N]	F _{Mx} [N]	F _{My} [N]	F _{Mz} [N]	A [N]	B [N]	C [N]	D [N]	F _{T 1} [N]	F _{T 2} [N]	τ ₁ [Nmm ⁻²]	τ ₂ [Nmm ⁻²]	Jistota 1 [-]	Jistota 2 [-]
Provozní zatížení	1	-119	3	-1079	2	0,6	-367,3	-486,3	367,3	-58,9	-60,1	541,0	544,5	0,03	0,03	1072,8	1065,9
	2	-158	0	-1438	0	0,0	-489,5	-647,5	489,5	-79,0	-79,0	723,3	723,3	0,03	0,03	802,4	802,4
	3	-106	2	-2034	1	0,4	-692,4	-798,4	692,4	-52,6	-53,4	1017,2	1019,6	0,05	0,05	570,6	569,3
	4	-115	4	1368	2	0,8	465,7	350,7	-465,7	-56,7	-58,3	688,8	684,1	0,03	0,03	842,7	848,5
	5	-190	0	-1012	0	0,1	-344,7	-534,9	344,7	-95,0	-95,2	514,8	515,3	0,02	0,02	1127,4	1126,3
	6	-253	-4	-1349	-2	-0,7	-459,3	-712,7	459,3	-127,4	-126,0	688,5	684,4	0,03	0,03	843,0	848,1
	7	-11	440	0	259	88,0	-0,2	-10,8	0,2	82,7	-93,3	258,3	258,8	0,01	0,01	2246,8	2243,0
Havarijní zatížení	X (15g)	3321	129	-1733	76	25,8	-590,0	2731,0	590,0	1686,3	1634,7	1839,2	1909,2	0,09	0,09	315,6	304,0
	Y (-3g)	24	-990	1	-582	-198,0	0,3	24,3	-0,3	-186,0	210,0	581,2	582,2	0,03	0,03	998,6	996,9
	Y (3g)	24	990	-1	582	198,0	-0,3	23,7	0,3	210,0	-186,0	581,2	582,2	0,03	0,03	998,6	996,9
	Z (-4,5g)	0	-1	-1737	-1	-0,2	-591,3	-591,3	591,3	-0,2	0,2	869,1	867,9	0,04	0,04	667,9	668,8
	Z (4,5g)	0	1	1737	1	0,2	591,3	591,3	-591,3	0,2	-0,2	869,1	867,9	0,04	0,04	667,9	668,8

Podpěra C

Zatížení		F _x [N]	F _y [N]	F _z [N]	F _{Mx} [N]	F _{My} [N]	F _{Mz} [N]	A [N]	B [N]	C [N]	D [N]	F _{T 1} [N]	F _{T 2} [N]	τ ₁ [Nmm ⁻²]	τ ₂ [Nmm ⁻²]	Jistota 1 [-]	Jistota 2 [-]
Provozní zatížení	1	-185	-2	-2343	-1324,3	-236	-133,6	-1326,3	1324,3	-134,6	132,6	1410,9	939,7	0,13	0,09	211,8	318,0
	2	-252	0	-2392	-1352,0	-322	-182,0	-1352,0	1352,0	-182,0	182,0	2085,3	2725,7	0,19	0,25	143,3	109,6
	3	-166	-1	-2746	-1552,1	-212	-119,9	-1553,1	1552,1	-120,4	119,4	2539,3	2962,8	0,23	0,27	117,7	100,8
	4	-178	-2	-536	-303,0	-227	-128,6	-305,0	303,0	-129,6	127,6	356,2	783,9	0,03	0,07	838,7	381,1
	5	-302	0	-2347	-1326,6	-386	-218,3	-1327,1	1326,6	-218,5	218,0	1984,1	2749,9	0,18	0,25	150,6	108,6
	6	-408	2	-2398	-1355,3	-521	-294,7	-1353,5	1355,3	-293,8	295,6	1920,3	2947,5	0,18	0,27	155,6	101,4
	7	-86	425	-184	-104,3	-110	-62,0	320,6	104,3	150,5	274,4	113,8	306,3	0,01	0,03	2624,6	975,4
Havarijní zatížení	X (15g)	5472	-65	1086	613,8	6992	3952,0	548,8	-613,8	3919,5	-3984,5	8051,3	9756,9	0,74	0,90	37,1	30,6
	Y (-3g)	193	-956	-415	-234,6	247	139,4	-1190,6	234,6	-338,6	-617,4	689,2	256,1	0,06	0,02	433,5	1166,5
	Y (3g)	-193	956	-415	-234,6	-247	-139,4	721,4	234,6	338,6	617,4	256,1	689,2	0,02	0,06	1166,5	433,5
	Z (-4,5g)	-1	0	-1132	-639,8	-1	-0,7	-639,8	639,8	-0,7	0,7	1130,7	1133,3	0,10	0,10	264,2	263,6
	Z (4,5g)	1	0	1132	639,8	1	0,7	639,8	-639,8	0,7	-0,7	1130,7	1133,3	0,10	0,10	264,2	263,6